Ueber den Einfluß des Kesselsteins und ähnlicher wärmehemmender Ablagerungen auf Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit von Heizvorrichtungen.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Diplomingenieur

Ernst Reutlinger

aus München.

Referent: Herr Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Herr Professor Paul von Lossow.

Berlin 1909.

Ueber den Einfluß des Kesselsteins und ähnlicher wärmehemmender Ablagerungen auf Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit von Heizvorrichtungen.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Vorgelegt von

Diplomingenieur

Ernst Reutlinger

aus München.

Referent: Herr Professor Dr. Oscar Knoblauch.
Korreferent: Herr Professor Paul von Lossow.

Berlin 1909.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555407_0032

Inhalt.

Seite

Einleitung 5

I. Abschnitt. Versuche über Wärmedurchgang durch reine und verunreinigte Bleche 7

Zweck der Versuche 7

Versuchsanordnung 7

a) Heizung 7

b) Verdampfungsgefäß 9

c) Wärmemessung 9

d) Temperaturmessung 10

1) Blechtemperaturen 10

2) Lufttemperaturen 10

3) Heizplattentemperaturen 10

Eichung der Thermoelemente 11

Beharrungszustand 11

Herstellung der Ablagerungen 12

Gang und Durchführung der Versuche 13

Auswertung der Versuchsergebnisse 14

(Wärmemengen, Durchgangzahlen, Blech- und Lufttemperaturen, Kurven.)

Folgerungen aus den Versuchsergebnissen 19

1) Wärmeübergang Blech — Wasser 19

A) Uebergangwiderstand bei reiner Heizfläche 19

B) » bei Steinbelag 21

2) Wärmeübertragung an die Heizfläche 23

A) Uebertragung durch Berührung 23

B) » » Strahlung 24

C) » » Strahlung und Berührung 24

a) unter den Versuchsverhältnissen 24

b) Verallgemeinerung 26

c) Gesetzmäßigkeit und Charakter der K-Kurven . . . 27

d) Ursache der Abnahme der Wärmeübertragung . . . 29

II. Abschnitt. Einfluß der Verunreinigungen auf die Verminderung des Wärmedurchgangs 29

A) Wärmeübertragung durch Berührung und Strahlung . . 29

B) » » » allein 30

a) Heizgas als Wärmeträger 31

b) Sattdampf oder Flüssigkeit als Wärmeträger 32

1) Mäßiger Wärmeübergang 32

2) Gesteigerter Wärmeübergang 33

III. Abschnitt. Einfluß auf die Wärmeausnutzung in Heizvorrichtungen 34

Allgemeiner Lösungsweg 34

Fall I. Temperatur des Wärmegebers und des Wärmenehmers längs der Heizfläche unveränderlich 35

Beispiele (Sudpfannen) 36

Fall II. Temperatur des Wärmegebers unveränderlich, des Wärmenehmers veränderlich 36

a) Allgemeine Lösung 37

b) Beispiele (Vorwärmer) 37

Seite

Fall III. Temperatur des Wärmegebers veränderlich, des Wärmenehmers unveränderlich 40
A) Wärmeträger: Dampf und Flüssigkeit 40
B) Wärmeträger: Heizgas 40
1) Uebertragung durch Konvektion und Leitung . . 41
a) Lösungsweg und Beispiel 41
b) Einfluß des veränderlichen c_p auf die Berechnung 42
2) Uebertragung durch Berührung u. Strahlung (Dampfkessel 45
a) Allgemeiner Lösungsweg 45
b) Strahlung auf der ganzen Heizfläche 46
c) » nur an einem Teil der Heizfläche . . 48
d) Einfluß der Forcierung 50
(Lokomotivbetrieb S. 56.)
e) Zusammenfassung 55
C) Wirkung von Schlamm 56
D) Literatur 56
Fall IV. Temperatur beider Wärmeträger längs der Heizfläche veränderlich 57
a) Allgemeine Lösung 57
b) Beispiel (Ekonomiser) 58
c) Literatur 58
Wirkung von Oel- und Fettablagerungen 59
IV. Abschnitt. Einfluß der Verunreinigungen auf die Betriebsicherheit . 60
A) Erhöhung der Blechtemperaturen 60
a) Größe und Wirkung der Wärmestauung 61
b) Literatur 62
B) Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Kesselbaustoffe bei hohen Temperaturen 62
C) Folgen der Temperaturerhöhung und Festigkeitsverminderung der Bleche 66
a) Wärmespannungen 66
b) Undichtheiten 66
c) Verminderung des Sicherheitskoeffizienten 67
d) Einbeulung, Ausbauchung 67
e) Rißbildungen und Explosionsgefahr 68
f) Sonstige Verminderung der Betriebsicherheit 69
V. Abschnitt. Wirtschaftlichkeit der Wasserreinigung bei der Dampferzeugung 69
A) Gewinnnachweisrechnung 69
a) Allgemein 69
b) Beispiele 70
1) Ortfeste Anlage, mäßig hartes Wasser , ... 70
2) » » , Grubenwasser 71
3) Lokomotivbetrieb (forciert) 71
B) Zusammenfassung 72
Tabelle für die Wirtschaftlichkeit der Anlage bei verschiedenen Kesselarten 72
Schlußwort 72

Ueber den Einfluß des Kesselsteins und ähnlicher wärmehemmender Ablagerungen auf Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit von Heizvorrichtungen.

Von **Ernst Reutlinger.**

Einleitung.

Die technische Verwendung von Fluß- oder Grundwasser als Wärmeträger in Heiz- oder Kühlvorrichtungen ist stets mit der lästigen Begleiterscheinung verbunden, daß bei der Erwärmung ein Teil der in jedem natürlichen Wasser in Lösung befindlichen festen Bestandteile mit der Aenderung der Druck- und Temperaturverhältnisse, sei es durch chemische Umsetzung, sei es durch Ueberschreiten des Sättigungszustandes der Lösung, zur Ausscheidung gelangt und auf den zur Wärmeübertragung dienenden Metallflächen mehr oder weniger feste Ablagerungen bildet.

Diese Niederschläge besitzen, ebenso wie die bei Verwendung von Fabrikationsabwässern oder Maschinendampfwasser entstehenden Verunreinigungen, nur geringes Wärmeleitvermögen; sie beeinflussen infolgedessen einerseits den Wärmedurchgang in ungünstiger Weise, während sie andererseits in Heizvorrichtungen, die mit hohen Temperaturen arbeiten und an die Festigkeit der Baustoffe gesteigerte Anforderungen stellen, durch Erhöhung der Blechtemperaturen, ferner auch durch Verengung von Querschnitten und dergl., die Sicherheit des Betriebes gefährden und zu empfindlichen Störungen Anlaß geben können.

Während der schädliche Einfluß des Kesselsteines und ähnlicher Niederschläge auf die Zuverlässigkeit und Betriebsicherheit von Heizvorrichtungen durch die Erfahrungen der Praxis hinlänglich klargelegt ist, herrschen über die Größe der durch Ablagerungen erzeugten Wärmeausnutzungsverluste, namentlich über Verluste in Dampfkesseln, in Fachkreisen noch sehr weit auseinandergehende Ansichten, deren Unsicherheit dem Aufblühen einer weitverbreiteten und äußerst schädlich wirkenden Geheimmittelindustrie einen fruchtbaren Nährboden liefert.

Die Hauptaufgabe der nachstehenden Untersuchungen ist die Feststellung der Größenordnung von Wärmeausnutzungsverlusten, die durch wärmehemmende Ablagerungen in den technisch verwendeten Heizvorrichtungen hervorgerufen werden (unter besonderer Berücksichtigung der Dampfkessel).

Bei der Lösung dieser Aufgabe zeigte sich die Notwendigkeit, den Verlauf des Wärmedurchgangs an den verschiedenen Stellen der Heizfläche in reinem und verunreinigtem Zustande festzustellen, eine Untersuchung, die sich auf Grund der bisherigen versuchsmäßig begründeten Kenntnisse für die gleichzeitige Wärmeübertragung durch Berührung und Strahlung (direkte Feuerung) nicht hinreichend sicher anstellen ließ.

Um diesem Mangel, der sich auch sonst bei der Beurteilung des Wertes der einzelnen Heizflächenteile fühlbar macht, abzuhelfen und ein Urteil über Größe und Gesetzmäßigkeit des Wärmedurchgangs unter genannten Verhältnissen zu gewinnen, wurden auf Anregung und unter Leitung von Herrn Direktor Eberle im Auftrage des internationalen Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine im chemischen Laboratorium des Bayerischen Revisions-Vereins[1]) Versuche mit reinen Blechen und mit künstlich hergestellten Verunreinigungen angestellt, deren Durchführung dem Verfasser als derzeitigem Beamten des Vereins übertragen wurde[2]), und die im Nachstehenden zunächst behandelt werden. Die Ergebnisse der Versuche liefern Aufschluß über die Größe der durch die Verunreinigungen entstandenen Uebergangswiderstände zwischen Blech und Wasser, und ermöglichen die Untersuchung und zahlenmäßige Bestätigung einer Gesetzmäßigkeit für die Wärmeübertragung an Heizflächen bei gleichzeitiger Berührung und Strahlung.

Im Anschluß an die Besprechung der Versuchsergebnisse, die in sinngemäßer Anwendung im Verlauf der weiteren Untersuchungen stets für den Fall der allgemeinsten Uebertragung zu Grunde gelegt werden, wird die Größe des dem Wärmedurchgang hemmenden Einflusses der Verunreinigungen für die verschiedenen praktisch auftretenden Wärmeübertragungsverhältnisse eingehend untersucht, um dann mit den hierbei gewonnenen Werten den Verlauf des Wärmedurchgangs und damit die Größenordnung der Wärmeausnutzungsverluste für die wichtigsten Arten von Heizvorrichtungen mit besonders eingehender Behandlung der Dampfkesselverhältnisse festzustellen. Dabei liefert die mittels der festgestellten Gesetzmäßigkeit durchgeführte Berechnung der durch Berührung und Strahlung übertragenen Wärme bei reinen Heizflächen stets Ausnutzungszahlen, die mit den Erfahrungswerten gut übereinstimmen. Das einschlägige, der Literatur entnommene Forschungs- und Versuchsmaterial wird, um Wiederholungen zu vermeiden, an der jeweils entsprechenden Stelle besprochen.

Der Einfluß des Kesselsteins und ölhaltiger Verunreinigungen auf die Betriebsicherheit der Dampferzeuger wird an Hand der bei den Versuchen festgestellten Temperaturerhöhungen und der derzeitigen Kenntnisse über die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Metalle bei höheren Temperaturen kurz beleuchtet, und schließlich wird unabhängig von den vorhergehenden

---

[1]) Als Abkürzung für »Bayerischer Revisions-Verein« wird an späterer Stelle die Bezeichnung »B. R. V.« verwendet.

[2]) Herrn Direktor Eberle spreche ich für die Uebertragung der Versuchsdurchführung und die Ueberlassung des Materials zur selbständigen weiteren Verarbeitung auch an dieser Stelle meinen Dank aus. Gelegentlich der 38. Delegierten- und Ingenieurversammlung des Intern. Verbandes der Dampfkessel-Ueberwachungsvereine in Wiesbaden wurde durch Herrn Direktor Eberle ein Bericht über den Einfluß des Kesselsteins auf den Wärmedurchgang erstattet, der in dem Versammlungsprotokoll veröffentlicht und im gleichen Wortlaut in der Zeitschrift des B. R. V. 1909 S. 61 u. f. abgedruckt ist. Darin sind die Vorversuche, Versuche und Versuchsergebnisse (unter Betonung des Anteils des Verfassers) kurz beschrieben und in unmittelbarer Anlehnung an letztere ist ein Beispiel für den Ausnutzungsverlust in einem Flammrohrkessel durchgerechnet. Die in vorliegender Arbeit für Dampfkessel gepflogenen Berechnungen unterscheiden sich, soweit sie sich an die Versuchsergebnisse anlehnen, in den Rechnungsgrundlagen wesentlich von dem erwähnten Beispiel; alle übrigen Berechnungen sind unabhängig von den erwähnten Versuchen durchgeführt.

Untersuchungen die wirtschaftliche Bedeutung der Verwendung weichen Wassers dargetan lediglich auf Grund von Erfahrungen, die in Betrieben mit Speisewasserreinigung auf Grund sorgfältiger Buchführung gesammelt wurden.

I. Abschnitt.

Versuche über Wärmedurchgang durch reine und verunreinige Bleche.

Zweck der Versuche war ein Vergleich der Wärmemengen, die unter den gleichen Heizungsverhältnissen durch eine Blechplatte mit reiner und mit verunreinigter wasserberührten Oberfläche an siedendes Wasser übertragen werden, und gleichzeitig die Feststellung der durch die Ablagerungen hervorgerufenen Blechtemperaturen; die Wärmeübertragung sollte den Bedingungen, wie sie in Dampfkesseln herrschen, möglichst gleichkommen.

Da der Genauigkeitsgrad derartiger an Dampfkesseln vorgenommener Versuche mit Rücksicht auf die unausschaltbaren Nebeneinflüsse (Wirkungsgrad der Feuerung, Oberflächenzustand der Blechfeuerseite) sehr gering ist, mußten die Versuche in einem kleineren Versuchsapparat vorgenommen werden, in dem die Wärmeübertragungsverhältnisse denen in unmittelbar gefeuerten Verdampfungsvorrichtungen möglichst angenähert wurden[1]).

Versuchsanordnung.

a) Heizung.

Die Notwendigkeit, für die Vergleichsversuche eine in möglichst weiten Grenzen veränderliche und sicher meßbare Höchsttemperatur herzustellen, ließ von der den wirklichen Verhältnissen am nächsten kommenden Gasfeuerung absehen. (Vorversuche mit Gasheizung ergaben bedeutende Schwierigkeiten, die Temperatur der Heizgase in größeren Gebieten zu ändern; die Schwierigkeit, die in den Gasen herrschende Höchsttemperatur, und namentlich die Temperatur unmittelbar unter der geheizten Platte genau festzustellen, wurde in einer ähnlichen Versuchsanordnung von Bryant[2]) nachgewiesen.

Man wählte daher als wärmeabgebenden Körper eine in einen zylindrischen Ofen, der aus Korkstein hergestellt und mit Chamotte ausgekleidet war, eingebaute Gußplatte von 20 mm Stärke, die mit massiver ringförmiger Rippe versehen war (siehe Fig. 1 und 2). Sie wurde durch symmetrisch verteilte sogen. Münchner Gasbrenner mit regelbarer Luftzufuhr von unten geheizt, deren Abgase durch einen breiten Schlitz in einen Kamin abgeführt wurden. Mit Glimmerplättchen bedeckte Schaulöcher dienten zur Beobachtung des Zurückschlagens der Brenner, die bei höheren Temperaturen mittels naßgehaltener Lappen gekühlt werden mußten.

Die verhältnismäßig große Eisenmasse der Heizplatte erwies sich als geeignet, die durch Wechsel im Gasdruck auftretenden Temperaturschwankungen auszugleichen: nach Eintritt des Beharrungszustandes ließ sich, lediglich durch Regulierung der Gasbrenner, die Temperatur der Heizplatte auf 2 bis 3° C genau

---

[1]) Die gewählte Art der Versuchsdurchführung wurde gelegentlich eines im Jahre 1906 bei der in Mailand tagenden Versammlung des Intern. Verbandes gehaltenen Vortrages von Herrn Direktor Eberle begründet. (Zeitschr. des B. R. V. 1907 S. 108.)

[2]) Miss E. M. Bryant: Ueber den thermischen Zustand von Eisen, Stahl und Kupfer als Kesselwandung, Min. of Proceedings of the Instit. of Civil Eng. Vol. CXXXII, 1898.

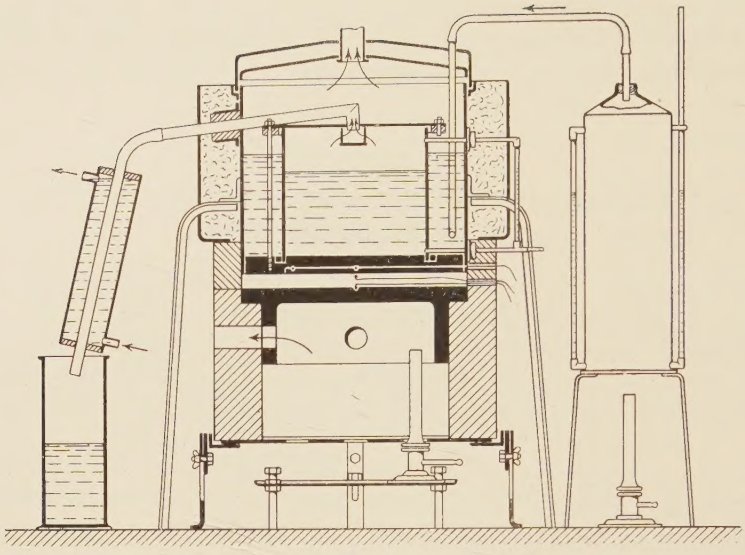

Fig. 1. Versuchsanordnung 1 : 10.

halten. Das hierdurch beherrschbare Temperaturgebiet erstreckte sich von 300 bis 600° C; für höhere Temperaturen mußten Gas-Sauerstoffbrenner verwendet werden, deren Mischraum Sauerstoff unter Benutzung eines Druckausgleichbehälters zugeführt wurde; der Druck in letzterem wurde mittels Regulierventils unverändert gehalten. Die durch den Sauerstoffzusatz erreichbare Höchsttemperatur der Heizplatte betrug rd. 700 °; bei weiterer Steigerung der Temperatur verursachten die Stichflammen der Gebläse lokale Ueberhitzung der Gußplatte.

Zwischen der Heizplatte und dem eigentlichen Versuchsgefäß befand sich eine durch einen Korksteinring nach außen gut isolierte Luftschicht. Bei der

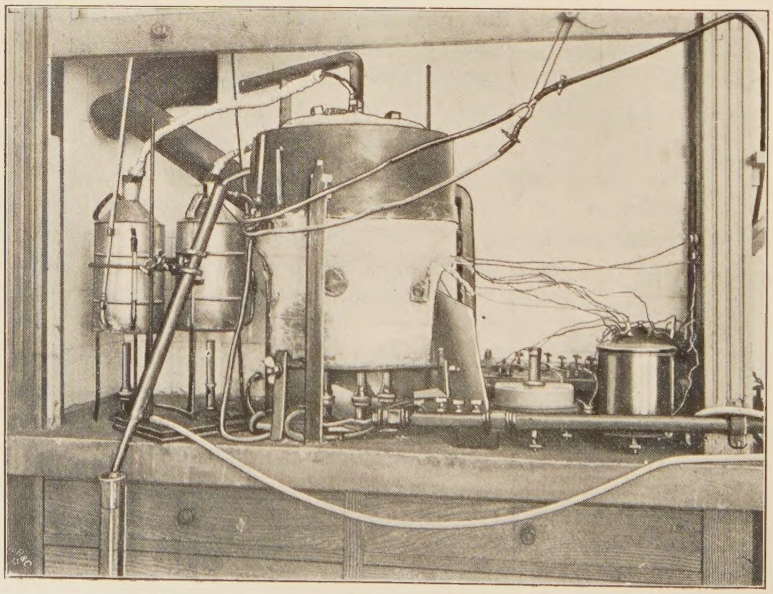

Fig. 2.

gewählten Heizvorrichtung erfolgte die Wärmeübertragung an das Versuchsblech einerseits durch Strahlung von der Heizplatte aus und andererseits durch Leitung und Konvektion von Seiten der zwischen Heizplatte und Versuchsgefäß befindlichen, ebenfalls durch die Ofenplatte erwärmte Luftschicht.

b) Verdampfungsgefäß.

Das zur Untersuchung bestimmte, auf beiden Seiten mit Walzhaut bedeckte Flußeisenblech von 20 mm Stärke wurde als Heizfläche in ein Versuchskesselchen eingefügt. Letzteres bestand aus 2 koncentrisch ineinander angeordneten Verdampfungsgefäßen mit gemeinsamer Bodenplatte, dem Versuchsblech. Das innere eigentliche Versuchsgefäß von rd. 190 mm Durchm. wurde seitlich durch einen fest aufgeschraubten, mit Eisenkitt in eine Nut des Bodens eingedichteten Blechcylinder begrenzt und war nach oben durch eine dünne Blechplatte dicht abgeschlossen. Dieses Gefäß wurde zur Vermeidung äußerer Wärmeverluste in Anlehnung an das Hirsch'sche [1]) Schutzring-Prinzip von einem äußeren Ringgefäß umgeben (300 mm Durchm.) Beide Gefäße waren während der Versuche mit siedendem Wasser gefüllt, dem die Verdampfungswärme durch die gemeinsame Bodenplatte gleichmäßig zugeführt wurde [2]). Zur Beobachtung der Höhe des Wasserspiegels waren an beiden Gefäßen Wasserstandsgläser angeordnet, die gleichzeitig Anschlußstutzen zum Anfüllen des Kesselchens trugen. Zur Aufrechterhaltung des Siedezustandes im Außenmantel erwies sich wegen der großen Strahlungsverluste eine sorgfältige Wärmeisolierung des Mantels und außerdem eine Zuführung von Heizdampf als notwendig; letzterer wurde in zwei seitlich angeordneten Blechgefäßen erzeugt und ohne Ueberdruck in den Außenring eingeleitet. Da außerdem bei dem unten zu schildernden Einbringen eines Steinniederschlages sich die Zylinderwände mit einer schlecht wärmeleitenden Schicht bedeckten, erfüllte der Außenring vollständig den Zweck des Schutzringes, ein seitliches Temperaturgefälle und damit ein Ausströmen von Wärme durch die Zylinderwand oder den Deckel zu verhindern. Der ganze Raum um und über dem inneren Gefäß wurde durch das kochende Wasser und den abziehenden Dampf auf der dem Barometerstand entsprechenden Siedetemperatur gehalten. Nach oben wurde der Versuchskessel durch einen mit isolierender Luftschicht versehenen Deckel abgeschlossen, durch den der in Außenmantel gebildete Dampf ins Freie abzog.

c) Wärmemessung.

Durch diese Anordnung wurde erreicht, daß die gesamte die Versuchsheizfläche durchströmende Wärme lediglich zur Dampferzeugung im inneren Gefäß diente; der hier gebildete Dampf strömte in einen im Deckel des Zylinders befestigten Kupferstutzen, der, von Heizdampf umspült, mit starkem Gefälle zu einem Kühler führte. Hier wurde der erzeugte Dampf niedergeschlagen und in einem Wägegefäß aufgefangen. Ein unterhalb des Abführungsstutzens angebrachtes Spritzblech verhinderte Ueberkochen des siedenden Wassers. Da die Versuche erst nach Eintritt des Siedezustandes in beiden Gefäßen begonnen wurden, stellt die Verdampfungswärme des aufgefangenen Wassers unmittelbar die durch die Versuchsheizfläche geströmte Wärmemenge dar.

[1]) J. Hirsch, Expériences sur les coups de feu des chaudieres. Lumière électrique 36 S. 44, 1890.

[2]) Ein ähnlicher Apparat wurde von Berget zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Quecksilber verwendet. Chwolson, Lehrbuch der Physik. III, S. 379.

d) Temperaturmessung.

Zur Messung der Blechtemperaturen, sowie der Temperatur der heißen Luftschicht benutzte man Thermo-Elemente aus Kupfer- und Konstantandraht (0,6 m Stärke, rd. 1,5 m Länge, 1,5 Ω Widerstand). Die Lötstellen wurden durch Verschweißen der Drähte unter Benutzung von Borax als Flußmittel in einer reduzierenden Gebläseflamme hergestellt und durch Abfeilen auf die erwünschte Dimension gebracht.

1) Blechtemperatur. Zur genauen Feststellung der Temperatur in bestimmter Tiefe der Versuchsplatte war es notwendig, die Lötstellen an genau meßbaren Punkten zu befestigen; ferner mußten die Drähte ein Stück lang auf gleicher Temperatur weiter geführt werden[1]), um zu schnelle Wärmeabführung und damit Meßfehler zu vermeiden. Beide Bedingungen ließen sich durch die in Fig. 3 dargestellte Befestigungsart gut erfüllen; in die Versuchsplatte wurde eine keilförmige, 7,0 mm tiefe Nut eingefräst, in welche die auf Drahtstärke reduzierten

Fig. 3.

Lötstellen in leichte Körner eingebettet, und durch einen genau metallisch anschließenden Keil samt den Drähten eingepreßt wurden. Infolge der metallischen Berührung des Verschlußkeils mit den Seitenflächen ließ sich ein vollkommener Temperaturausgleich zwischen den Meßstellen und der Versuchsplatte erreichen, sodaß die Thermoelemente tatsächlich die Temperatur der Niveaufläche anzeigten. Es wurden 2 Meßstellen angeordnet; ein Element am Rande und ein zweites in der Mitte der inneren Versuchsheizfläche; die Drähte wurden innerhalb der Nut gegenseitig und gegen das Blech durch Glimmerplättchen elektrisch isoliert, außerhalb der Platte wurde die Isolierung durch Asbestumwicklung verstärkt.

2) Lufttemperatur. Bei der Messung der Lufttemperatur unmittelbar unter der Versuchsplatte mittels eines Thermoelementes war zu beachten, daß das Element gegen die wärmestrahlende Wirkung sowohl der Heizplatte, als der Versuchsplatte zu schützen war, um wirkliche Angaben der Lufttemperatur zu erzielen. Daher versah man die Schweißstelle mit einem glatten Staniol-Ueberzug, der die Wärmestrahlung dieser Körper reflektieren sollte. Da dieser Ueberzug unter dem Einfluß hoher Temperatur nur kurze Zeit seinen Glanz behielt, so kam man, um ein häufiges Auswechseln des schwer zugänglichen Elementes zu vermeiden, zu dem Ausweg, neben der Lötstelle des Luftelementes, das man ungeschützt ließ, die beiden Lötstellen eines leicht auswechselbaren Differentialelementes anzubringen, dessen eine Lötstelle mit Staniol überzogen war. Die Angaben dieses Differentialelementes dienten als Berichtigungen für die Ausschläge des Luftelementes. Als Meßgerät wurde ein Siemens-Halske'sches Zeigergalvanometer verwendet, an das die Elemente durch einen Quecksilberumschalter der Reihe nach angeschlossen werden konnten; bei höherer Lufttemperatur wurde in den Stromkreis des Luftelementes mittels eines Stöpselrheostaten ein dem Eigenwiderstand des Galvanometers gleicher Widerstand eingeschaltet, um den Zeigerausschlag in zweckmäßigen Grenzen zu halten.

3) Heizplattentemperatur. Zur Messung der Heizplattentemperatur wurde ein Platin-Platinrhodiumelement verwendet, dessen im Sauerstoffgebläse hergestellte Schweißstelle in das Material der Ofenplatte eingebettet und durch Verstemmen

[1]) Nusselt, Diss. München 1908, S. 29.

festgehalten wurde; die Drähte wurden in dünnwandigen Porzellanröhrchen von 1 mm l. W. über die Oberfläche der Gußplatte durch den Isolierring zu einem in °C eingeteilten Zeigergalvanometer von Keiser & Schmidt geführt (Vorversuche zeigten, daß auf dem der Versuchsheizfläche gegenüberliegenden Teil der Heizplatte stets gleiche Temperatur herrschte).

Eichung der Elemente.

Die verwendeten Kupfer-Konstantan-Elemente, die sämtlich aus einem Drahtvorrat im chemischen Laboratorium des B. R. V. hergestellt wurden, wurden vor den Versuchen, zwischen den einzelnen Versuchsreihen und nach Abschluß der Versuche zusammen mit den verwendeten Meßgeräten empirisch geeicht.

Die Eichung geschah bis zu 350° C in dem elektrisch geheizten, mit hochsiedendem Oel gefüllten Thermostaten des Laboratoriums für technische Physik, dessen Benutzung von Herrn Professor Dr. O. Knoblauch[1]) in entgegenkommender Weise gestattet wurde[2]). Als Vergleichthermometer wurden kurze in $^1/_5{}^0$ geteilte von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeichte Normalthermometer verwendet, zur Berichtigung des herausragenden Fadens wurde das Mahlke'sche Fadenthermometer benutzt. Die Eichkurve der Elemente stimmten bei sämtlichen Prüfungen vollständig überein; ein Element, dessen Angaben bei der ersten Eichung abwichen, deckte sich in seiner E. M. K. infolge Alterung bei den späteren Prüfungen mit den übrigen. Eine von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgenommene Messung der Thermokraft eines Elementes aus demselben Drahtvorrat lieferte eine identische Kurve. Die Beziehung zwischen thermoelektrischer Kraft in Millivolt und der Temperatur läßt sich in dem Meßgebiet (50—300°) durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$\alpha = 0{,}04102\ t + 0{,}000028\ t^2 - 0{,}2089.$$

Das zur Messung der Lufttemperatur bestimmte Element wurde nach dem Vorgang von Nusselt[3]) im Salpeterbad bis zu 550° geeicht; in derselben Vorrichtung wurde das Platin-Platinrhodium-Element zusammen mit dem bei den Versuchen verwendeten Meßgerät geprüft.

Beharrungszustand.

Der Umstand, daß sich dank der Kleinheit der zu erwärmenden Massen der Beharrungszustand in dem System sehr schnell einstellte, so daß sich die einzelnen Versuche in Pausen von $^3/_4$ bis 1 st aneinanderschließen konnten, war für die Durchführung der Versuche mit Verunreinigungen sehr wichtig. Um ein durch Erkalten des Apparates zu erwartendes Lossprengen der Beläge zu vermeiden, mußte während der gesamten Versuchsperiode der Siedezustand im Verdampfungsgefäß ständig aufrecht erhalten werden; der schnelle Eintritt des Beharrungszustandes für die einzelnen Versuche gestattete, mindestens 2 sich kontrollierende Versuchsreihen, die sich über das ganze beherrschbare Temperaturgebiet erstreckten, in je 2 bis 3 Tagen durchzuführen.

Für sämtliche Versuche wurde zur Vermeidung vorzeitigen Steinansatzes oder einer Vermehrung der vorhandenen Ablagerungen nur destilliertes Wasser in beiden Gefäßen verwendet.

---

[1]) Es ist dem Verfasser ein Bedürfnis, Herrn Professor Dr. O. Knoblauch für seine wertvollen Anregungen und für das rege Interesse am Fortschreiten der Arbeit auch hier aufrichtig Dank zu sagen.

[2]) Die im Thermostaten eingestellte Temperatur läßt sich auf $^1/_{10}{}^0$ genau beliebig lange halten.

[3]) a. a. O. S. 33.

Herstellung der Ablagerungen.[1])

Der Wärmedurchgang durch das Versuchsblech wurde beobachtet

1) bei reinem Zustande der Platte,
2) bei Verunreinigung der Wasserseite durch 2 im Laboratorium hergestellte Kesselsteinbeläge verschiedener Zusammensetzung und Stärke,
3) bei Verunreinigung der Innenseite durch einen teerhaltigen Ueberzug in 2 verschiedenen Schichtstärken.

Die Außenseite der Versuchsplatte, die auf der Walzhaut eine leichte Oxydschicht trug, wurde vor Beginn jeder Versuchsreihe sorgfältig gereinigt.

Steinbeläge.

Die Steinbeläge wurden durch Verdampfen von Wasser hergestellt, das mit Härtebildnern verschiedener Zusammensetzung künstlich angereichert war. Da zum Ausscheiden der Kesselsteinbildner nur eine Temperatur von 100° C zur Verfügung stand, mußte von vornherein auf eine im Vergleich zum praktischen Kesselbetrieb verhältnismäßig lange Bildungsdauer der Beläge gerechnet werden, zumal ein zu lebhaftes Verdampfen das Ansetzen von Stein erschwert oder Lossspringen eines bereits gebildeten Belages herbeiführt. Der Ersatz der im Versuchsapparat verdampften Lösung fand kontinuierlich von einem hochstehenden, als Mariotte'schen Flasche wirkenden Glasballon aus statt. Letzterer hielt durch Vermittlung zweier Anschlußstutzen den Wasserstand im inneren Kochgefäß und im Außenmantel infolge seiner Heberwirkung stets gleich.

Erster Belag.

Zur Herstellung des ersten Belages wurde Münchner Leitungswasser (normal 16 Härtegrade) verwendet, dem bei Zimmertemperatur Gips bis zur Sättigung zugesetzt war; die Gesamthärte der Lösung betrug 104 Härtegrade. Der aus dieser Lösung entstandene Stein bedeckte Boden- und Seitenflächen des Versuchsaparates gleichmäßig und hatte nach 8 Tagen und Nächten lebhafter Verdampfung eine nachträglich gemessene Stärke an der Bodenfläche von im Mittel 1,48 mm angenommen. Derselbe war nach Abschluß der Versuchsreihe nur unter Anwendung von Hammer und Meißel zu entfernen, war sehr hart und besaß dichtes krystallinisches Gefüge.

Zweiter Steinbelag.

Zur Herstellung eines zweiten Steinbelages wurde eine Lösung von Gips und kohlensaurer Magnesia in Münchner Leitungswasser während einer Dauer von 50 Tagen ununterbrochen im Versuchsapparat eingedampft; die Anwesenheit der Magnesia hatte zur Folge, daß ein großer Teil der Härtebildner bei den herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen sich lediglich als Schlamm ausfällen ließ, dessen stete Bewegung das feste Ansetzen eines Steines verlangsamte; die nach Verlauf von 7 Wochen erzielte Stärke der Steinschicht betrug im Mittel 5,5 mm und erstreckte sich in gleichmäßiger Dicke fast über die ganze Versuchsheizfläche. Vor Beginn der Versuche wurde der auf dem festen Stein abgesetzte Schlamm sorgfältig entfernt. In Bezug auf Struktur und Härte wies der Stein, in dem sich eine deutliche Schichtenbildung erkennen ließ, ähnliche Eigenschaften auf, wie der erste Belag.

[1]) Die Ablagerungen wurden von dem Chemiker des B. R. V., Herrn Dipl.-Ing. A. Zschimmer hergestellt, der dem Verfasser auch sonst bei der Durchführung der Versuche vielfach in dankenswerter Weise behilflich war.

Teeranstriche.

Das Festbrennen von Oelrückständen, das ursprünglich beabsichtigt war, ließ sich bei den anwendbaren Temperaturen nicht erreichen; um festhaftende Ablagerungen von ähnlicher Eigenschaft zu erhalten, löste man pulverisierten Asphalt in einer teerhaltigen Anstrichmasse, der man zur Erhöhung der Zähigkeit unvulkanisierten Kautschuk beigab. Die Lösung wurde zur Entfernung flüchtiger Bestandteile bis zu einer Konsistenz eingedampft, die gerade noch ein gleichmäßiges Ausstreichen auf die bis zu 220° erhitzte Versuchsplatte zugab; die Anwendung dieser hohen Temperatur verhinderte ein Wiedererweichen des Ueberzuges während der Versuche.

Nach der Durchführung einer Versuchsreihe mit diesem Anstrich wurde der Ueberzug durch ein nochmaliges Ueberstreichen unter den gleichen Maßregeln verstärkt; die Dicke des zweiten Belages wurde später zu rd. 0,3 mm festgestellt.

Gang und Durchführung der Versuche.

Es wurde in geeigneten Zeitabständen (je nach der Versuchsdauer 5 oder 10 Minuten) beobachtet: die Temperatur der Heizplatte, der heißen Luft und die des Bleches an zwei Stellen, ferner Barometerstand und Außenlufttemperatur. Die im Kochgefäß verdampfte und im Kühler niedergeschlagene Wassermenge wurde in Zwischenabschlüssen von 10 bis 15 Minuten gewogen.

Vor Versuchsbeginn wurde die Wasserkühlung des Kondensators in Gang gesetzt und Außen- und Innenbehälter mit kochendem destillierten Wasser gefüllt; der Wasserstand wurde stets tunlichst in gleicher Höhe gehalten. Die Versuche wurden erst begonnen, wenn im gesamten Versuchskessel und in den beiden Heizdampfkesselchen der Siedezustand sicher vorhanden war und die Temperaturmessungen völligen Beharrungszustand erwiesen. Galvanometer und Quecksilberumschalter waren durch eine Asbestplatte vor der Bestrahlung von der Seite des Ofens geschützt, die Lufttemperatur an den Klemmen des Umschalters war, wie öfters beobachtet, die gleiche wie im übrigen Versuchsraum; die kalten Lötstellen der Elemente wurden in U-förmig gebogenen Glasröhrchen in schmelzendem Eis gelagert.

Von den Versuchen wurden nur die zur Ausarbeitung verwertet, bei denen die Zwischenabschlüsse (3 bis 4) der Wasserwägung vom Mittelwert um höchstens 1 vH abwichen.

Reihenfolge der Versuche.

Zunächst fand eine Versuchsreihe mit dem dünneren Steinbelag statt, an die nach Entfernung des Bodenbelages eine Versuchsreihe mit der reinen Platte angeschlossen wurde.

Nach Herstellung des zweiten, stärkeren Steines wurden in gleicher Weise zwei vergleichende Versuchsreihen durchgeführt. Dabei ergab sich bei den Versuchen mit reinem Blech gegenüber der ersten Versuchsreihe eine geringe Aenderung des Wärmedurchgangs; eine Erklärung dieser Erscheinung ist in der durch die lange Beheizung erfolgten stärkeren Oxydierung der Plattenaußenfläche zu suchen [1]).

---

[1]) Ueber den starken Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit s. die Arbeit von Bryant, E. M. Bryant, Minutes of Proc. of the Instit. of Civil Engineers Vol. CXXXII, a. a. O.; eine Aenderung der Blechtemperaturen, d. h. des Wärme-Uebergangs-Widerstandes auf der Wasserseite war bei gleicher Heizflächenbeanspruchung gegenüber der ersten Versuchsreihe nicht eingetreten.

Nach Abschluß der zweiten Versuchsreihe wurde der ganze Apparat behufs Nacheichung der Elemente auseinander genommen. In der, wie sich später erwies, richtigen Voraussetzung, daß die nunmehr herzustellenden Oelbeläge sich nur schwer wieder vollständig aus dem Versuchskessel entfernen ließen, wurde nach der Neumontierung des Apparates zunächst eine Versuchsreihe mit der reinen Platte durchgeführt, deren Ergebnisse sich genau mit denen der entsprechenden vorhergehenden deckten; im Anschluß daran wurden die Teeranstriche eingebracht und die Versuche vorgenommen. (Zu Beginn dieser Versuchsreihen zeigte sich eine Störung in der Blechtemperaturmessung, die auf einen Kurzschluß innerhalb der Nut zurückzuführen war; da sich der eingerostete Keil nur unter gänzlicher Deformierung hätte entfernen lassen, verzichtete man auf die Blechtemperaturmessung und beobachtete lediglich den Einfluß der Anstriche auf den Wärmedurchgang.)

Auswertung der Versuchsergebnisse.

1) Wärmemenge und Durchgangszahlen.

Die bei einem Versuche stündlich durch ein qm Heizfläche geströmte Wärmemenge wird, da sich das Wasser stets auf Siedetemperatur befand, in einfacher Weise durch Multiplikation der auf die Stunde umgerechneten Menge des während des Versuches aufgefangenen Dampfkondensats mit der (dem Barometerstand entsprechenden) Verdampfungswärme des Wassers gefunden, unter Berücksichtigung der jeweils in Betracht kommenden Größe der Versuchsheizfläche.

Zahlentafel 1.

Ergebnisse der 1. Versuchsgruppe.

1	2	3	4
Temperatur der Heizplatte t_h °C	Temperatur des Bleches (Meßstelle) t_m °C	stündlich auf 1 qm übertragene Wärme W	Durchgangszahl K
Versuchsreihe a) reine Versuchsheizfläche.			
380	111,1	9 040	32,05
412	113,5	10 730	34,21
452	117.6	14 090	39,80
492	118,0	17 430	44,35
535	119,0	21 150	48,50
604	131,6	31 400	62,20
615	135,0	32 520	62,90
Versuchsreihe b) Steinbelag I (1,48 mm Stärke).			
354	111,2	6 645	25,90
370	113,0	7 350	27,04
397	116,7	9 540	31,90
406	115,9	9 520	30,95
445	124,6	13 040	37,60
448	122,2	13 240	37,85
469	131,0	14 670	39,60
503	130,0	18 120	44,75
532	136,0	21 040	48,51
539	135,0	21 360	48,45
552	144,5	22 120	48,75
557	139,0	21 700	47,30
618	158,6	29 820	57,22
635	158,5	32 190	59,95
645	154,0	33 460	61,22

Zahlentafel 2.

Ergebnisse der 2. Versuchsgruppe.

1	2	3	4
t_h °C	t_m °C	W	K
Versuchsreihe a) reine Versuchsheizfläche.			
310	104,2	5 115	24,13
311	106,1	5 115	24,00
348	108,2	7 100	28,39
349	108,3	6 695	26,67
358	107,9	6 940	26,69
445	113,9	12 860	37,05
450	113,9	12 750	36,23
451	113,9	12 070	34,19
510	116,4	16 920	41,07
547	121,0	21 330	47,49
549	123,0	21 330	47,29
555	122,6	21 890	47,90
574	124,4	23 800	50,00
605	129,5	27 300	53,96
647	131,8	31 935	59,20
Versuchsreihe b) Steinbelag II (5,5 mm Stärke).			
299	104,5	3 870	19,35
301	104,8	3 760	18,61
326	107,6	4 360	19,21
331	105,0	5 140	22,06
350	112,1	5 725	22,80
361	111,0	5 940	22,67
390	115,6	7 350	25,26
413	117,8	7 245	23,07
413	119,6	8 895	28,24
417	119,0	8 005	25,18
455	125,8	10 205	28,66
490	134,4	12 010	30,71
499	133,9	12 660	31,56
505	135,9	13 160	32,41
523	144,7	15 710	37,04
541	151,8	17 480	39,54
548	153,6	17 370	38,68
553	—	17 810	39,23
553	153,5	17 830	39,19
556	153,9	18 775	41,08
585	158,0	19 850	40,83
637	179,0	27 350	50,70
645	180,4	26 530	48,50
650	182,4	27 910	50,60
665	181,2	28 760	51,50
677	189,0	30 480	52,60

Zahlentafel 3.

Ergebnisse der 3. Versuchsgruppe.

1	2	3
t_h °C	W	K
Versuchsreihe a) reine Versuchsheizfläche.		
303	4 620	22,61
372	8 230	30,11
436	12 050	35,72
482	14 620	38,14
551	21 300	47,09
Versuchsreihe b) dünner Teeranstrich.		
317	3 860	17,60
333	4 480	19,05
372	5 980	21,82
382	6 550	23,06
439	9 080	26,64
450	9 590	27,24
459	10 130	28,06
502	12 860	31,84
510	13 210	32,07
519	13 920	33,07
561	17 220	37,19
581	17 770	37,81
Versuchsreihe c) starker Teeranstrich.		
310	3 400	16,04
348	4 640	18,57
390	5 570	19,07
402	6 320	20,79
447	7 750	22,22
469	9 030	24,34
499	10 040	25,05
517	11 340	27,07
523	11 460	26,95
572	13 660	28,81
580	15 540	32,24
583	15 460	31,88
583	14 710	30,20

Ist W die stündlich auf 1 qm übertragene Wärmemenge,
G das Gewicht des in z Minuten aufgefangenen Kondensats,
V die Verdampfungswärme des Wassers,
F die Versuchsheizfläche in qm,

so ist

$$W = \frac{G\,V\,60}{F\,z}\ \mathrm{WE} \times \mathrm{m}^{-2} \times \mathrm{st}^{-1}.$$

Die Größe der Heizfläche betrug bei den Versuchen mit dem dünnen Steinbelag und den Vergleichsversuchen mit reiner Platte 0,0296 qm; für die sämtlichen anderen Versuchsreihen hatte sich die wasserbedeckte Heizfläche infolge der beim Einkochen des stärkeren Steines gebildeten und im Apparat belassenen Steinschicht an den Seitenwandungen auf 0,0286 qm verringert.

Die Gesamtwärmedurchgangszahl, d. h. die stündlich auf 1 qm Heizfläche für ein Grad Temperaturunterschied zwischen der strahlenden Heizplatte (t_h) und dem siedenden Wasser (t_w) ist demnach

$$K = \frac{W}{t_h - t_w} \text{ WE} \times \text{m}^{-2} \times \text{st}^{-1} \times {}^0\text{C}^{-1}.$$

Die aus den Versuchen berechneten Werte von W und K sind, ebenso wie die beobachteten Heizplatten- und Blechtemperaturen, in den Zahlentafeln 1, 2 und 3 zusammengestellt.

2) Blechtemperaturen.

Die in den Zahlentafeln 1 bis 3 aufgenommenen Blechtemperaturen t_m beziehen sich auf die Meßstelle (7,0 mm von der Außenseite, 13,0 mm von der Wasserseite entfernt)[1]).

3) Lufttemperatur.

Die Temperaturen der Luftschicht (von denen in der weiteren Bearbeitung nur die bei den Vergleichsversuchen mit dem stärkeren Stein beobachteten verwendet wurden) zeigen mit sehr geringer Streuung ein lineares Steigen mit der Ofenplattentemperatur; sie sind nebst den Berichtigungsangaben des Differenzelementes in Zahlentafel 4 enthalten, wobei sich für den Steinbelag eine durchschnittlich um 15° geringere Temperatur ergibt, als bei den übrigen Reihen. Diese Erscheinung ist durch eine Undichtheit im Isolierring zu erklären.

Zahlentafel 4.

Lufttemperaturen der 2. Versuchsgruppe.

Heizplatten-temperatur	abgelesene Lufttemperatur:		Angabe des Diff.-Elements (Korrektur)	richtige Lufttemperatur:	
	reine Heizfläche	Steinbelag II		reine Heizfläche	Steinbelag II
t_h	t_l''	t_l'''	t_d	t_l	t_l'
°C	°C	°C	°C	°C	°C
300	221,0	210,0	56,0	165	154
400	294,5	281,0	74,8	220	206
500	368,5	351,0	93,0	276	258
600	442,0	422,0	112,0	330	310

4) Kurven.

Die durch die Versuchspunkte gelegten Kurven für die Wärmeleistung W der Heizfläche, d. h. die stündlich auf 1 qm übertragene Wärmemenge, sowie die daraus berechneten Durchgangszahlen K sind in Abhängigkeit von der Heizplattentemperatur in den Fig. 4 bis 8 dargestellt. Für die Blechtemperaturen

[1]) Die Angaben des Randelementes stimmten bei den Versuchen mit reiner Platte mit denen des mittleren genau überein; bei der Verunreinigung der Platte ergaben sich infolge Verschiedenheiten in der Belagstärke an den Meßstellen geringe Differenzen in den Angaben der zwei Elemente; für die weitere Rechnung wurden die Angaben des mittleren Elementes verwendet, da die Belagstärke in der Mitte des Gefäßes fast genau dem Mittelwert derselben über die ganze Fläche entsprach.

ergibt sich eine lineare Abhängigkeit von der Heizflächenbeanspruchung; als Beweis für die Richtigkeit der Temperaturmessung dient der Umstand, daß für den Wärmeübergang 0 auch der Temperaturunterschied Blech-Wasser zu 0 wird, Fig. 9 und 10.

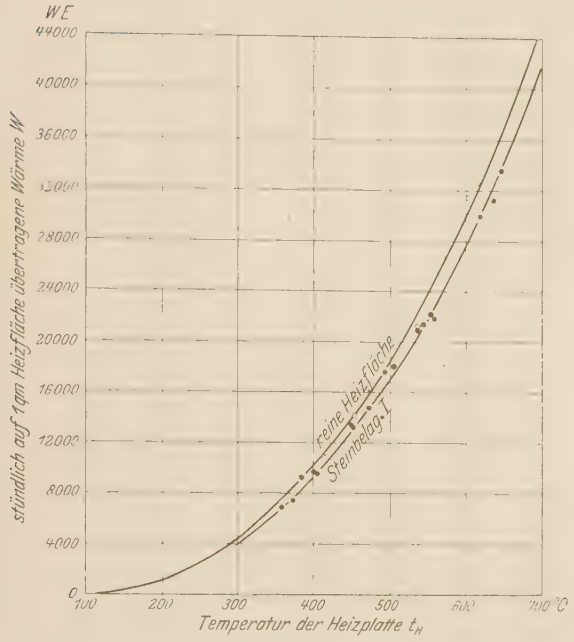

Fig. 4.

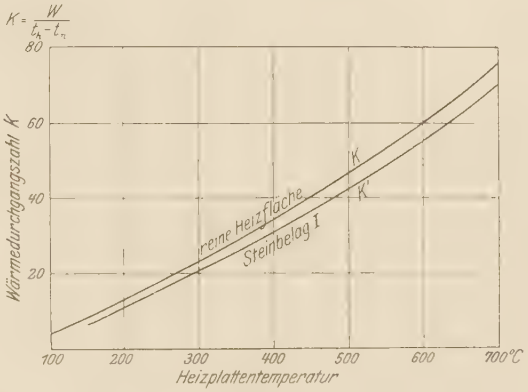

Fig. 5.

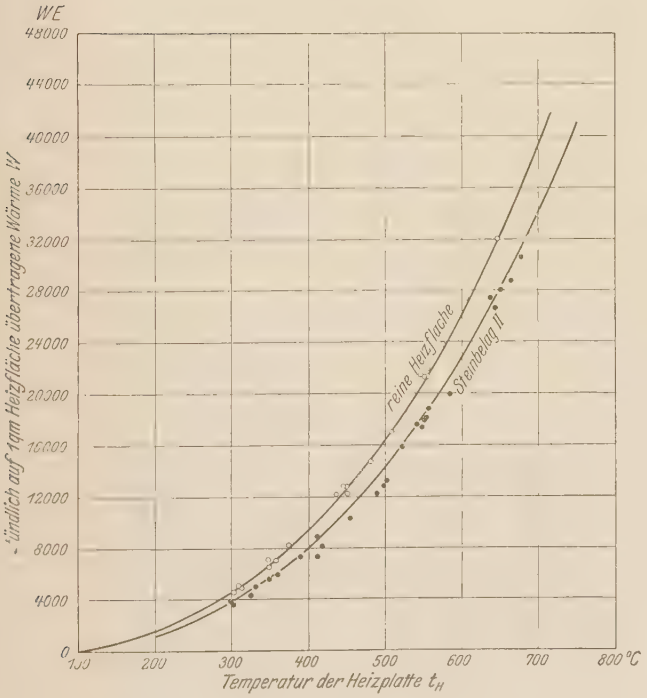

Fig. 6.

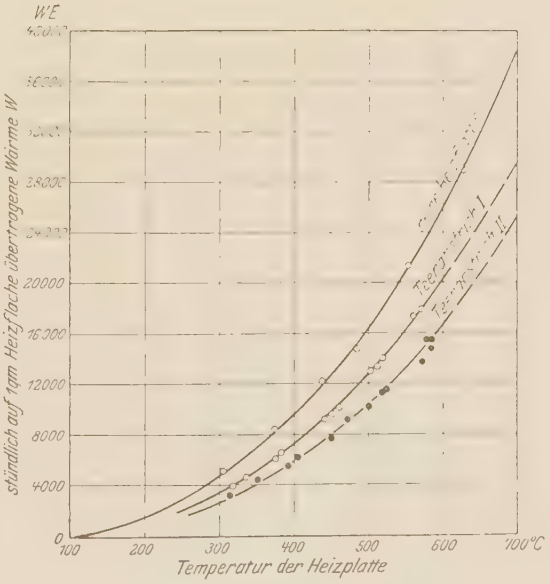

Fig. 7.

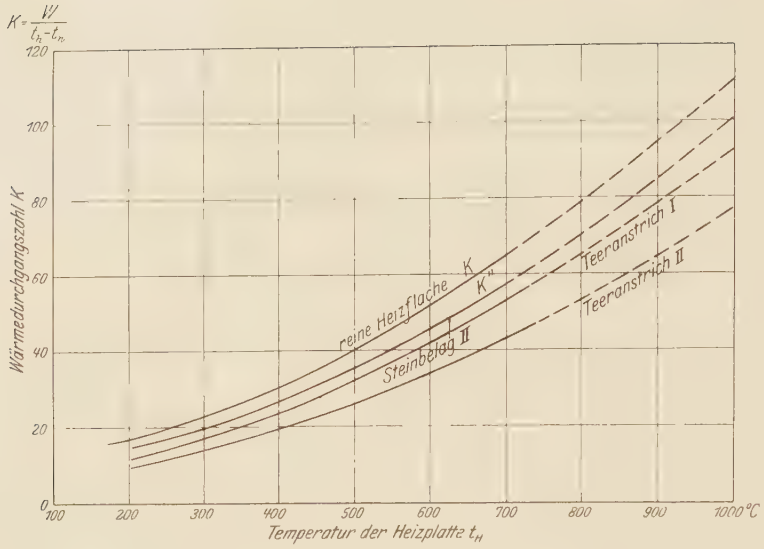

Fig. 8.

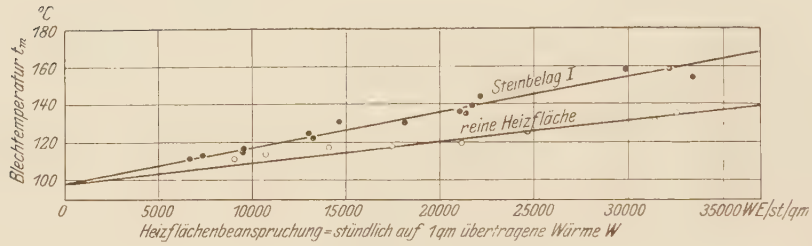

Fig. 9.

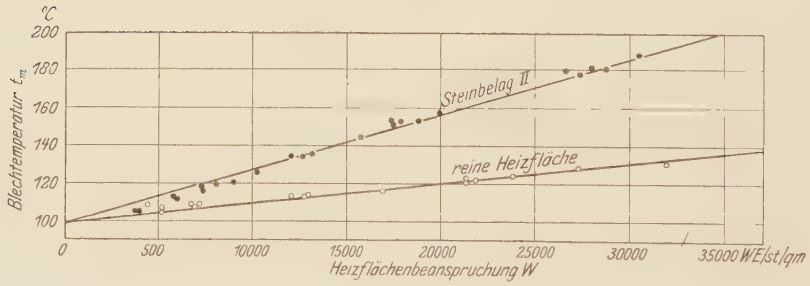

Fig. 10.

Sämtliche Versuchsreihen weisen im Vergleich zu den gleiche Zwecke verfolgenden Versuchen der Ph. T. Reichsanstalt[1]), sowie der Miss E. M. Bryant[2]) eine sehr geringe Streuung auf. Die Aufgabe der Versuche, Absolutwerte für die Durchgangszahlen K beim gleichzeitigen Wärmeübergang durch Strahlung und Berührung auf reine und verunreinigte Heizflächen, sowie eine gesetzmäßige Aenderung der Werte K mit der Höchsttemperatur zu finden, ist durch die erzielten Kurven befriedigend gelöst.

[1]) Mollier, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897 S. 153 u. 197.
[2]) a. a. O.

Folgerungen aus den Versuchsergebnissen.

1) Wärmeübergang von Blech an Wasser.

Die gleichzeitige Bestimmung der in der Zeiteinheit übertragenen Wärmemengen und der jeweils im Blech auftretenden Temperaturen ermöglicht eine Untersuchung der Widerstände, die sich dem Wärmestrom beim Uebergang von Metall an das Wasser bei reiner und bei verunreinigter Oberfläche entgegensetzten. Es sei ausdrücklich betont, daß die hierbei gefundenen Zahlenwerte für die Uebergangs- und Leitungsziffern keinen Anspruch auf absolute physikalische Genauigkeit machen, nachdem deren Bestimmung ja nicht den eigentlichen Zweck der Versuche bildete; es handelt sich vielmehr hauptsächlich um die Ermittlung der Größenordnung der einzelnen Werte. Für die durch Messung nicht festgestellten Größen werden daher zulässige Annahmen gemacht.

Es bezeichnet im folgenden:

t_h die Temperatur der strahlenden Heizplatte,
t_a » » des Versuchsbleches auf der Feuerseite,
t_m » » » » an der Meßstelle,
t_i » » » » auf der Wasserseite,
t_w » » » Wassers,
t_l » » der heißen Luft,
W » gesamte in der Stunde auf 1 qm Heizfläche übertragene Wärmemenge,
S den Anteil von W, der durch Strahlung übertragen wird,
B » » » W, » » Leitung und Konvektion übertragen wird,
λ die Wärmeleitfähigkeit des Eisens (m, °C, St.),
λ' » » » Steines,
δ Wandstärke des Eisens zwischen Meßstelle und Wasser (m),
δ' Stärke des Steines,
α_w Wärmeübergangsziffer[1]) von Metall an Wasser,
α_l » » Luft an Metall.

a) *Uebergangswiderstand bei reiner Platte.*

Oberflächen-Temperaturen des Bleches.

Für die Fortleitung der Wärme in einem Körper von der Dicke δ, dessen Oberflächentemperaturen im Beharrungszustand t_1 und t_2 sind, gilt die von Fourier aufgestellte Beziehung

$$W = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta}.$$

Das Temperaturgefälle zwischen zwei Punkten ist dabei (bei unverändertem λ) ein lineares.

Zur Berechnung der Blechtemperaturen an den Außenflächen der Versuchsplatte aus den gemessenen muß eine Annahme über die innere Wärmeleitfähigkeit λ der Eisenplatte gemacht werden. Die in der Literatur[2]) angegebenen Werte von λ schwanken zwischen 40 und 70, der Mittelwert aller Angaben beträgt 56,2; dieser Wert soll für das vorliegende Eisen zugrunde gelegt werden, der prozentuelle Einfluß eines Fehlers in der Annahme von λ auf die gesuchten Größen wird unten untersucht werden.

[1]) Uebergangsziffer bezeichnet die Wärmemenge, die zwischen 2 Körpern für 1° Temperaturunterschied der sich berührenden Flächen in einer Stunde auf 1 qm übergeht (reziproker Wert = Uebergangswiderstand).

[2]) Tabellen von Landolt-Börnstein, S. 507 (1905).

Aus den in Fig. 9 und 10 dargestellten Beziehungen zwischen Blechtemperatur und Wärmestrom ermitteln sich mit Hülfe der oben genannten Gleichung die Temperaturen

der Blechwasserseite zu $t_i = t_m - \frac{0{,}013}{56{,}2} W$,

der Blechaußenseite zu $t_a = t_m + \frac{0{,}007}{56{,}2} W$.

Uebergangsziffer.

Für den Uebergang eines Wärmestromes von der Oberfläche eines Körpers auf die eines denselben innig berührenden festen, flüssigen oder gasförmigen Körpers hat man in Anlehnung an das Gesetz der Wärmeleitung in einem homogenen Körper die empirische Beziehung aufgestellt $W = \alpha (t_1 - t_2)$, wobei analog $t_1 - t_2$ den Temperaturunterschied zwischen den beiden Oberflächen, α die Uebergangsziffer und $\frac{1}{\alpha}$ den Uebergangswiderstand bezeichnet. Für einen endlichen Uebergangswiderstand $\frac{1}{\alpha}$ muß demnach zwischen den Oberflächen der sich berührenden Körper ein endlicher Temperaturunterschied auftreten.

Beim Wärmeübergang von Metall an Wasser haben Grüneisen[1]) und Schauffelberger[2]) erstmals derartige »Temperatursprünge« (d. h. endliche Unterschiede) zwischen der Metalloberfläche und der benachbarten, beweglichen Flüssigkeitschicht festgestellt und Holborn und Dittenberger[3]), sowie Austin[4]) Untersuchungen über deren Größe angestellt. Das Auftreten derartiger Widerstände findet eine Erklärung zunächst in dem Umstand, daß im allgemeinen die Erwärmung der Flüssigkeit nur zum geringen Teile durch Leitung[5]), sondern hauptsächlich durch Konvektion der aufsteigenden wärmeren Teile erfolgt; unmittelbar an der Metallfläche haftet eine stagnierende, sehr dünne Flüssigkeitschicht, welche die Wärme nur durch Leitung überträgt und in der infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit des Wassers ein Temperaturabfall eintritt. Diese Schicht[6]) verhindert die Berührung der kälteren Flüssigkeitsteile mit der Metallwand und bringt so einen Temperaturunterschied zwischen der letzteren und der der Messung zugänglichen benachbarten Flüssigkeit hervor; bei siedender Flüssigkeit wird der Widerstand noch durch anhaftende, schlecht leitende Dampfblasen (Dampfpelz) vermehrt. Durch lebhafte Wasserbewegung (Rühren und dergl.)[7]) kann die stagnierende Schicht teilweise entfernt und $\frac{1}{\alpha_w}$ dadurch bedeutend verringert werden.

Die Wärmeübergangszahl α_w ist demnach keine für 2 Körper charakteristische Zahl, sondern eine von Form, Lage und Oberflächenbeschaffenheit der

[1]) Annalen der Physik 3, 343, 1900. } Zusammenstellung der Ergebnisse siehe Chwolson, Physik III S. 368.
[2]) Annalen der Physik 7, 589, 1902. }

[3]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1900 S. 1724.

[4]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1902 S. 1890.

[5]) Für Wärmestrahlung ist nach Versuchen von R. v. Helmholtz Wasser überhaupt nicht durchlässig. [Ueber Licht- und Wärmestrahlung verbrennender Gase, Verh. des Vereines zur Beförd. des Gewerbfleißes 1889 S. 227.]

[6]) Der bei den vorliegenden Versuchen festgestellte Uebergangswiderstand läßt sich durch eine stagnierende Schicht von 0,4 mm Wasser erklären (ohne Berücksichtigung der Dampfblasen).

[7]) Ueber den Einfluß des Rührens, s. Classen, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1902 S. 418.

Heizfläche, sowie dem Bewegungszustand der Flüssigkeit abhängige und in ziemlich weiten Grenzen veränderliche Größe.

Aus den vorliegenden Versuchen kann α_w für den Wärmeübergang von einer ebenen horizontalen Eisenwand an siedendes wenig bewegtes Wasser bestimmt werden.

Wie aus den Fig. 9 und 10 ersichtlich, besteht zwischen der Heizflächenleistung W und dem Temperaturunterschied zwischen der Meßstelle und dem siedenden Wasser die lineare Beziehung

$$a) \quad W = b\,(t_m - t_w).$$

Es ist ferner, der Definition der Uebergangsziffer α_w zufolge

$$b) \quad W = \alpha_w\,(t_i - t_w) = \alpha_w\,(t_m - \frac{\delta}{\lambda}\,W - t_w).$$

Durch Eliminierung von W aus beiden Gleichungen ergibt sich für

$$\alpha_w = \frac{1}{\frac{1}{b} - \frac{\delta}{\lambda}},$$

also ein von der Heizflächenbeanspruchung unabhängiger konstanter Wert; durch Einsetzen der bei den Versuchen mit reiner Platte in Betracht kommenden Zahlenwerte von b, δ und λ ergibt sich α_w zu 1154.

(Für $\lambda = 40$ hätte sich $\alpha_w = 1295$, für $\lambda = 70$ $\alpha_w = 1095$ ergeben.) Dieser Wert ist bedeutend kleiner, als die von Holborn und Dittenberger, sowie von Austin gefundenen (3000 bis 6000). Eine Erklärung ist darin zu finden, daß die von den genannten Forschern benutzten Versuchsapparate hauptsächlich senkrechte Heizflächen enthielten, von denen die stagnierende Schicht durch aufsteigende Strömungen leichter entfernt werden konnte; die lebhaftere Wasserbewegung bei heftigem Kochen erklärt auch das Anwachsen von α_w mit W, wie es von Holborn und Dittenberger gefunden wurde.

Der hier gefundene kleinere Wert bestätigt die Ansicht von Rude[1]), daß die bei den genannten Laboratoriumsversuchen gefundenen Werte gegenüber den Erfahrungen der Praxis zu hoch seien.

b) Uebergangswiderstand bei Steinbelag.

Der Gesamtwiderstand $\frac{1}{\alpha_m}$, den eine schlechtleitende Verunreinigung der wasserberührten Oberfläche dem Wärmeübergang von Metall an das Wasser entgegengesetzt, entsteht aus 3 Einzelwiderständen: zwei Uebergangswiderständen, die in den Berührungsflächen Metall-Stein $\left(\frac{1}{\alpha_s}\right)$ und Stein-Wasser $\left(\frac{1}{\alpha_{w0}}\right)$ auftreten und sich in einem entsprechend großen Temperaturabfall äußern, sowie dem Durchgangswiderstand durch die Steinschicht, $\frac{\delta'}{\lambda'}$. Die stündlich auf die Flächeneinheit übertragene Wärme W' steht also zu dem Temperaturunterschied Blech-Wasser in der Beziehung

$$W' = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_s} + \frac{1}{\alpha_{w0}} + \frac{\delta'}{\lambda'}\right)}\,(t_i - t_w).$$

Was den Uebergangswiderstand $\left(\frac{1}{\alpha_s}\right)$ zwischen dem Metall und dem fest daran haftenden Stein anbelangt, so haben Wiedemann[2]) und Angström[3]) für

[1]) Dinglers polyt. Journal 1905 S. 435.
[2]) Pogg. Ann. 142, 626, 1871
[3]) Nova Acta Soc. Upsala 3, 351, 1861
} Chwolson, Phys. III S. 401.

den Fall der innigen Berührung zweier fester Körper, und zwar für Wärmeübergang von Metall an Metall, sowie Nusselt[1]) für den Uebergang von Metall auf schlechte Wärmeleiter nachgewiesen, daß ein endlicher Temperaturunterschied in der Berührungsfläche nicht auftritt, der Uebergangswiderstand also 0 ist.

Für den Wärmeübergang von Metall durch Stein an Wasser gilt demnach die vereinfachte Gleichung

$$W' = \alpha_w' (t_i - t_w) = \frac{1}{\frac{\delta'}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha_{w0}}} (t_i - t_w)$$

oder

$$t_i = W' \left(\frac{\delta'}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha_{w0}} \right) + t_w;$$

welcher zu entnehmen ist, daß die Blechtemperatur für einen Steinbelag geradlinig mit der Heizflächenbeanspruchung und der Schichtstärke steigt; für verschieden leitende, gleichstarke Ablagerungen ist diese Temperatursteigerung relativ um so schneller, je geringer die Leitfähigkeit λ' und je schlechter die Fähigkeit ist, die Wärme an das Wasser weiter zu führen.

Bei der kristallinischen wasserundurchlässigen Struktur des Steines und dessen fester glatter Oberfläche kann der Uebergangswiderstand $\frac{1}{\alpha_{w0}}$ von Stein zum Wasser unbedenklich als dem Widerstand von der Blechwalzhaut zum Wasser gleich oder nur unwesentlich verschieden angenommen werden: $\frac{1}{\alpha_{w0}} = \frac{1}{\alpha_w}$. Dann ist die aus Fig. 9 und 10 ersichtliche Erhöhung des Temperaturunterschiedes zwischen Blech und Wasser bei gleicher Heizflächenbeanspruchung lediglich dem Durchgangswiderstand durch den Stein zuzuschreiben und gibt eine Handhabe zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit λ' der Steine durch den Vergleich der Wärmemengen, die bei gleichem Temperaturunterschied zwischen Blech und Wasser mit und ohne Belag durch die Heizfläche übertragen wurden. Es ist nach früherem

$$W = \frac{t_i - t_w}{\frac{1}{\alpha_w}}; \quad W' = \frac{t_i - t_w}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta'}{\lambda'}} = \frac{t_i - t_w}{\frac{1}{\alpha_w'}}.$$

Durch Division der beiden Gleichungen ergibt sich

$$\frac{W'}{W} = \frac{1}{1 + \alpha_w \frac{\delta'}{\lambda'}}$$

und nach λ' aufgelöst:

$$\lambda' = \frac{W'}{W - W'} \alpha_w \delta'.$$

Für den stärkeren Steinbelag ergibt sich mit Hülfe der entsprechend der auf S. 21 gegebenen Ableitung: $\alpha_w = 1154$; $\alpha_w' = 367$, ferner mit $\delta' = 0{,}0055$ m, die Leitfähigkeit des Steines zu $\lambda' = 2{,}96$[2]).

Für den dünneren Steinbelag ergibt sich aus Fig. 9 die Beziehung

$$W' = 610 (t_i - t_w)$$

und mit

$$\delta' = 1{,}48 \text{ mm}$$

wird

$$\lambda' = 1{,}91.$$

[1]) a. a. O. S. 71.

[2]) Eine Fehlergröße in der Annahme von λ von annähernd 30 vH hätte einen Fehler von nur 5 vH in der Größe von λ' zur Folge gehabt.

Die Größe der für beide Steinbeläge gefundenen Leitfähigkeit stimmt mit den von W. Ernst[1]) mittels der Christiansen-Paalhornschen Methode gefundenen Werten gut überein, die dort angegebene Größe der Leitfähigkeit verschiedener Steine erstreckt sich über das Gebiet 1 bis 2,7. Der dünnere Stein kann demnach als mittelgut, der stärkere als gut leitend bezeichnet werden.

Die Zusammensetzung der Steine war nach der chemischen Analyse die folgende:

Zahlentafel 5.

Bestandteil	Steinbelag I (1,48 mm)	Steinbelag II (5,5 mm)
	Gewichtsprozente	
Kieselsäure	0,7	0,7
Eisenoxyd	0,9	Spuren
Tonerde	Spuren	»
kohlensaurer Kalk	15,2	2,7
schwefelsaurer Kalk	80,8	82,2
kohlensaure Magnesia	2,4	14,6

Ein Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Leitfähigkeit läßt sich bei den Steinen gleicher Struktur und Dichte nicht erkennen.

2) Wärmeübertragung an die Heizfläche.

Wie oben erwähnt entspricht die Art der Wärmeübertragung an die Versuchsheizfläche dem allgemeinen Fall in der Feuerungstechnik, die Wärme wird der Heizfläche durch direkte Berührung eines als Wärmeträgers dienenden Gases und durch Strahlung von einem hochtemperierten festen Körper aus zugeführt. Die beiden Vorgänge seien zunächst getrennt betrachtet.

Uebertragung durch Berührung.

Für den Wärmeübergang durch Berührung von Heizgas an eine Metallwand gilt ebenso, wie für die oben besprochenen Fälle der Berührungsübertragung I) $B = \alpha_l (t_l - t_a)$. Ueber den Wert α_l liegen zwar wenig genaue Versuchswerte vor, doch ist seine Größenordnung hinreichend genau bestimmt. Für den Uebergang zwischen ruhender Luft und Metall schwankt α_l nach Versuchen von Dulong und Petit[2]) (je nach Form und Art der Heizfläche) zwischen 2 und 8, aus Versuchen des B. R. V.[3]) mit Dampfleitungen berechnen sich für den Uebergang an mäßig bewegte Luft ähnliche Werte; Nusselt[4]) fand $\alpha_l = 3$ bis 10 bei ruhender Luft, $\alpha_l = 25$ bei einer Luftgeschwindigkeit von 3 m. Aus zahlreichen Versuchen der Praxis an Speisewasservorwärmern wurden Uebergangszahlen $\alpha_l = 8$ bis 15 bei einer durchschnittlichen Heizgasgeschwindigkeit von 3 bis 5 m festgestellt. Bei außerordentlich großen Geschwindigkeiten in engen Querschitten (Heizröhren der Lokomotiven) kann α_l bis auf ungefähr 40 gesteigert werden[5]). Aus allen vorliegenden Versuchen geht hervor, daß α_l für die normalen Gasgeschwindigkeiten in den Kesselzügen zwischen 10 und 25 liegt.

[1]) Sitzungsberichte der kaiserl. Akademie der Wissenschaften, Wien, Bd. 62, Abt. IIa, Juli 1902.

[2]) Mollier, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897 S. 153 u. f.

[3]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1908 S. 539.

[4]) a. a. O. S. 66.

[5]) Vergleiche die unten angeführten Versuche der Railw. Eng. Dep. of the Univ. of Illinois S. 58 dieser Arbeit.

Temperatursprung.

Der im Vergleich zu dem Uebergang von Metall an Wasser sehr große Uebergangswiderstand $\frac{1}{\alpha_l}$ läßt sich nur durch das Vorhandensein eines größeren Temperatursprunges zwischen Metall und den bewegten Gasschichten erklären. Gehrke[1]) und Smoluchowski[2]) haben das Vorhandensein eines solchen durch Versuch nachgewiesen, letzterer mittels der kinetischen Gastheorie begründet.

Uebergang durch Strahlung.

Der Wärmeaustausch zweier gegenüberstehender Körper verschiedener Temperatur durch Strahlung findet nach dem von Stefan-Boltzmann für den absolut schwarzen Körper theoretisch abgeleiteten und durch zahlreiche Versuche mit genügender Annäherung auch für andre Körper bewiesenen Gesetze statt. Es lautet allgemein

$$S = F\,\varphi\,\frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma}} \quad [3]) \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (II),$$

wobei T_1 und T_2 die absoluten Temperaturen, σ_1 und σ_2 die Strahlungskonstanten der beiden Körper, und σ die des absoluten schwarzen Körpers bedeutet, und φ das »Winkelverhältnis« bezeichnet, d. h. den Bruchteil der von dem einen Körper ausgehenden Strahlung, der den andern Körper trifft.

Uebergang durch Strahlung und Berührung.

Die beim gleichzeitigen Uebergang durch Leitung, Konvektion und Strahlung übertragene Gesamtwärme W kann durch Addition der aus Gl. (I) und (II) berechneten Anteile B und S gefunden werden, sobald die Koeffizienten α_l, σ_1, σ_2 und φ genau genug bekannt sind, also

$$W = B + S = \alpha_l\,(t_l - t_a) + \frac{\left(\frac{T_h}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} - \frac{1}{\sigma}}\,F\,\varphi\,,$$

es ist dann

$$K = \frac{W}{t_h - t_w}\,.$$

Da die Wärmedurchgangszahl K außer von der Höchsttemperatur t_h und der Wassertemperatur t_w bei gleichzeitiger Uebertragung durch Berührung und Strahlung auch ganz wesentlich von der Temperatur der bestrahlten Fläche abhängig ist, läßt sich eine einfache Beziehung zwischen K und dem Temperaturunterschied $t_h - t_w$ nicht allgemein aufstellen (wie dies von einigen Forschern versucht wurde).

An Hand der Luft- und Blechtemperaturmessungen sowie der durch Fig. 6 graphisch gegebenen Beziehung zwischen der Heizplattentemperatur und der stündlich übertragenen Wärmemenge wurde nun versucht, den gemessenen Gesamtwärmeübergang W in seine beiden Bestandteile zu zerlegen und so zu prüfen, ob die oben angeführten Gesetze, unter Annahme wahrscheinlicher Koeffizienten, durch die Versuchsergebnisse erfüllt sind.

[1]) Ann. der Physik 2, 102, 1900
[2]) Chem. Zentralblatt 2, 353, 1899
} Chwolson, Lehrb. der Phys. III S. 402.

[3]) Mach, Prinzipien der Wärmelehre 1900 S. 141 u. f.

Bei Berechnung des Strahlungsanteils konnte für die beiden sich zustrahlenden Flächen, leichtoxydiertes Eisen, die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers $\sigma = 4{,}6$ eingesetzt werden, wodurch sich Gl. (II) zu der Form

$$S = 4{,}6\, F\, \varphi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(IIa)}$$

vereinfacht.

Bei dem geringen Abstand der beiden Versuchsplatten war eine gegenseitige vollkommene Bestrahlung ($\varphi = 1$) anzunehmen, dagegen ließ sich bei der Konstruktion des Versuchsapparates nicht vermeiden, daß die Versuchsheizfläche nicht nur von Strahlen der gemessenen Temperatur T_h[1]), sondern auch von Strahlen der außen liegenden kälteren Teile der Heizplatte getroffen wurde, die somit die wirksame mittlere Temperatur etwas herabdrückten. Eine experimentelle Feststellung der Temperaturverteilung auf der Heizplatte und damit der Temperatur T_1, war dem Verfasser nicht möglich, doch ließ sich dieselbe auf Grund des Umstandes, daß für die Strahlung der beiden Körper das Stefan-Boltzmannsche Gesetz erfüllt sein muß, auf folgendem Wege rechnerisch bestimmen: Nach Abzug des mit der richtigen Temperatur T_1 berechneten Strahlungsanteiles S von der Gesamtwärme W mußte für jeden Punkt der beiden W-Kurven ein Berührungsanteil B verbleiben, der, durch den bei den Versuchen bestimmten Temperaturunterschied $(t_i - t_a)$ dividiert, einen innerhalb der wahrscheinlichen Grenzen liegenden und für die ganze Versuchsreihe nur wenig veränderlichen Wert für α_i ergab.

Dies wurde mit großer Genauigkeit für den gesamten Verlauf der beiden Kurven erfüllt, sobald die Temperatur T_h der strahlenden Heizplatte um 4 vH herabgesetzt wurde; geringe Aenderungen eines der gewählten Koeffizienten ergaben unmögliche Werte für den Berührungsanteil.

Die sich nach diesem Verfahren ergebenden Einzelwerte für den Berührungs- und Strahlungsanteil sowie für den Uebergangskoeffizienten sind für die reine Platte in Zahlentafel 6, für den Steinbelag in Zahlentafel 7 zusammengestellt. Die Zahlenwerte der Spalten 2, 3, 6 und 7 sind unmittelbar den in Kurven aufgetragenen Versuchsergebnissen entnommen, die Zahlenwerte der Spalten 4, 5 und 8 nach den oben festgelegten Gesetzmäßigkeiten berechnet, wobei für t_a die jeweils vorhandene Außentemperatur des Bleches eingesetzt wurde. Die durch die beiden Versuchsreihen erfüllte Gesetzmäßigkeit lautet demnach

$$W = \alpha_i\,(t_i - t_a) + 4{,}6 \left[\left(\frac{0{,}96\, T_h}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right].$$

Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz ist also befriedigend erfüllt, für die Uebergangsziffern finden sich Werte, die mit der sonstigen Erfahrung gut übereinstimmen und mit der Temperatur ganz wenig steigen[2]). Der Unterschied zwischen $\alpha_{(i\,\text{rein})}$ und $\alpha_{(i\,\text{belegt})}$ läßt sich durch den bei beiden Reihen verschiedenen Bewegungszustand der Luft erklären, der auch darin zum Ausdruck kommt, daß sich die Lufttemperaturen beider Reihen im Mittel um 15° unterscheiden.

---

[1]) T_h bezeichnet im folgenden immer die im betrachteten System auftretende Höchsttemperatur, also immer $K = \frac{W}{t_h - t_w}$

[2]) Nach Niederschrift der vorliegenden Arbeit erhielt Verfasser Kenntnis von Versuchen, die durch F. Wamsler im Laboratorium für Technische Physik in München durchgeführt wurden und in Uebereinstimmung mit obiger Annahme für Gußeisen einen der Strahlungskonstanten des schwarzen Körpers sehr nahe kommenden Wert lieferten.

Zahlentafel 6 und 7.
Zerlegung des Wärmeübergangs in seine Bestandteile.

1	2	3 (2 : 1)	4	5 (2 − 4)	6	7	8 [5 : (6 − 7)]
Temperaturunterschied zwischen Heizplatte u. Wasser $(t_h - t_w)$	stündlich auf 1 qm übertragene Gesamtwärme W	Durchgangszahl K	Strahlungsanteil S	Berührungsanteil B	Lufttemperatur t_l	Blechaußentemperatur t_a	Uebergangsziffer α_l
°C	WE	WE	WE	WE	°C	°C	
Zahlentafel 6. Reine Versuchsheizfläche.							
200	4 440	22,20	3 220	1220	165	104	**20,0**
300	9 140	30,46	6 920	2220	220	110	**20,2**
400	15 920	39,81	12 700	3220	276	118	**20,4**
500	25 370	51,33	21 245	4125	330	129	**20,5**
Zahlentafel 7. Steinbelag II.							
200	3 930	19,65	3 255	675	154	110	**15,4**
300	8 095	26,98	6 785	1310	206	122	**15,6**
400	14 140	35,35	12 315	1825	258	142	**15,75**
500	22 890	45,78	20 680	2210	310	170	**15,8**

Verallgemeinerung.

Die gute Uebereinstimmung der Versuchsergebnisse innerhalb des Meßgebietes d. h. für Wassertemperaturen von 100° und Höchsttemperaturem von 300 bis 700° C mit den angeführten, anderweitig bewiesenen Gesetzen gibt Grund zu der Annahme, daß der Verlauf des Wärmeüberganges auch bei anderen Temperaturverhältnissen als den durch die Versuchsanordnung bedingten unter sinngemäßer Verwendung ähnlicher Koeffizienten für den Zweck von Vergleichsrechnungen über den Einfluß von Verunreinigungen auf Grund der Gl. (I) und (II) berechnet werden kann.

Im praktischen Kesselbetrieb unterscheiden sich die Temperaturverhältnisse an den Heizflächenteilen, denen Wärme durch Strahlung und Berührung zuströmt, außer durch die Höhe der Wasser- und Heizgastemperaturen, insofern wesentlich dadurch von denen, die im Versuchsapparat erzielt werden konnten, als die Temperatur der festen strahlenden Teile (Mauerwerk, Rost) nicht bedeutend höher ist als die Gastemperatur, sondern etwas geringer (nach Mollier $0{,}8 - 0{,}9\ t_h$) zu setzen ist; außerdem wird auch, namentlich bei hohen Temperaturen, die Strahlungswirkung derselben durch die Strahlung der Heizgase etwas erhöht.

Es werde nun der allgemeine Fall der Wärmeübertragung betrachtet für 180° C Wassertemperatur; die Temperatur der festen strahlenden Teile wird zu etwa $0{,}85\ T_h$ angenommen, für die Zunahme der Strahlung durch das Gas muß ein passender Zuschlag gemacht werden. Es ergibt sich, wie die spätere Durchrechnung des Wärmeübergangs bei reinen Heizflächen zeigen wird, eine sehr gute Uebereinstimmung mit den Erfahrungen der Praxis, wenn dieser Zuschlag zu 10 bis 12 vH (die Verminderung von T_h also etwa 3,5 vH) und die Uebergangsziffer α_l konstant = 20 gewählt wird, die Gesetzmäßigkeit also die Form erhält

$$W = 20\,(t_h - t_a) + 4{,}6\left[\left(\frac{0{,}965\ T_h}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{100}\right)^4\right]$$

$$= 20\,(t_h - t_a) + 4\left(\frac{T_h}{100}\right)^4 - 4{,}6\left(\frac{T_a}{100}\right)^4 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(III)}.$$

Es sei besonders hervorgehoben, daß die gewählten Koeffizienten kein allgemein gültiges Gesetz für jeden beliebigen Kesselteil darstellen sollen; wo die Uebertragungsverhältnisse anders liegen als in den im Anschluß an das aufgestellte Gesetz später betrachteten Heizflächenteilen, sind die Koeffizienten den praktischen Erfahrungen gemäß abzuändern[1]).

Um einen unmittelbaren Vergleich über den Einfluß der Abänderung der Temperaturverhältnisse zu haben, werden zunächst 2 Fälle betrachtet, in denen die Uebergangswiderstände auf der Wasserseite genau die gleichen sind wie bei den Versuchen mit der reinen Platte und mit dem Steinbelage II; da ferner die bei den Versuchen erzeugten Steine noch ziemlich gut leitend sind, wird die Rechnung auch für einen Steinbelag mit der Leitfähigkeit $\lambda = 1$ und der gleichen Stärke (5,5 mm) durchgeführt und damit wohl die ungünstigsten Verhältnisse gewählt, die im praktischen Betrieb auftreten.

Verlauf des Wärmedurchgangs unter den geänderten Verhältnissen.

Für die Uebertragung an die Heizfläche ist das Gesetz (III) erfüllt; dasselbe enthält außer t_h noch die veränderliche Größe t_a, ist also für die später vorzunehmende rechnerische Feststellung des Wärmedurchgangs längs einer Kesselheizfläche in seiner Form noch wenig geeignet.

Für die Berechnung der Außentemperaturen des Bleches gilt nach früherem

$$t_a - t_w = W\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta'}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha_w}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad \text{(IV)}.$$

In der ersten Gleichung sind t_a und W als Funktionen der Heizgastemperatur t_h, in der zweiten Gleichung als Funktionen der für die einzelnen Beläge bekannten Koeffizienten dargestellt; die gleichzeitige Befriedigung der beiden Gleichungen durch Elimination von t_a liefert W als Funktion der Heizgastemperatur t_h und damit das gewünschte Gesetz für den Wärmeübergang in Abhängigkeit von der Heizgastemperatur. (Die Lösung geschieht am besten durch probeweises Einsetzen von t_a in beide Gleichungen.)

Gl. (IV) lautet für $t_w = 180°$:

für die reine Heizfläche $t_a = 180 + 0{,}001225\ W$ . . . (V),
» den Steinbelag II $t_a = 180 + 0{,}00308\ W$ . . . (VI),
» » » III $t_a = 180 + 0{,}006725\ W$ . . . (VII).

In den Zahlentafeln 8, 9 und 10 sind die rechnerisch ermittelten Einzelwerte von 100 zu 100° zusammengestellt, die Spalten 3 und 4 geben ein Bild über die Aenderung des gegenseitigen Verhältnisses von Berührungs- und Strahlungsanteil mit der Temperatur, die Spalten 5 veranschaulichen die Erhöhung der Blechtemperatur. Der Verlauf der Heizflächenleistung und der Durchgangszahlen unter den veränderten, der Wirklichkeit näher kommenden Temperaturverhältnissen ist in Kurvenform in Fig. 11 dargestellt.

Charakter der K-Kurven.

a) Reine Heizfläche.

Der Charakter der durch das obige versuchsmäßig gewonnene Gesetz festgelegten K-Kurven deckt sich, für die reine Heizfläche, vollständig mit dem der bei Versuchen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, sowie der Miß Bryant festgestellten Kurven. K steigt anfangs langsam und wächst mit stei-

[1]) Vergl. auch Bemerkung S. 45.

Zahlentafel 8 bis 10.

Wärmedurchgang unter der Wirklichkeit angenäherten Uebertragungsverhältnissen.

$$W = 20\,(t_h - t_a) + \left[4\left(\frac{T_h}{100}\right)^4 - 4{,}6\left(\frac{T_a}{100}\right)^4\right]. \qquad (t_w = 180^0\text{C.})$$

Zahlentafel 8. Reine Heizfläche.

1	2	3	4	5	6
$t_h - t_w$	W	S	B	t_a	K
^{0}C	(WE/st/qm)	(WE/st/qm)	(WE/st/qm)	^{0}C	(WE/st/qm/^{0}C)
100	2 850	940	1 910	183,5	28,5
200	8 920	5 140	3 780	190,9	44,6
300	16 160	10 560	5 600	199,9	53,9
400	26 000.	18 640	7 360	211,9	65,0
500	31 130	30 090	9 040	228,0	78,3
600	56 390	45 770	10 620	249,0	94,0
700	78 280	66 200	12 080	276,0	111,6
800	106 680	93 280	13 400	310,5	133,1

Zahlentafel 9. Steinbelag II.
($\delta' = 5{,}5$ mm, $\lambda' = 2{,}96$.)

1	2	3	4	5	6
$t_h - t_w$	W	S	B	t_a	K'
200	8 350	4 860	3490	203,6	41,75
300	15 100	10 060	5040	226,5	50,3
400	24 200	17 600	6600	274,5	60,5
500	36 390	28 490	7900	286,0	72,8
600	51 620	42 790	8830	338,5	86,0
700	71 140	61 480	9660	397,0	101,6
800	94 480	84 300	10180	471,0	118,1

Zahlentafel 10. Steinbelag III.
($\delta' = 5{,}5$ mm, $\lambda' = 1$.)

1	2	3	4	5	6
$t_h - t_w$	W	S	B	t_a	K''
200	7 340	4 330	3010	229,5	36,7
300	13 070	8 830	4240	268,0	43,6
400	20 680	15 500	5180	319,0	51,7
500	30 340	24 420	5920	384,0	60,7
600	42 100	35 740	6360	462,0	70,2
700	55 570	49 070	6500	555,0	79,3
800	70 980	64 480	6500	655,0	88,7

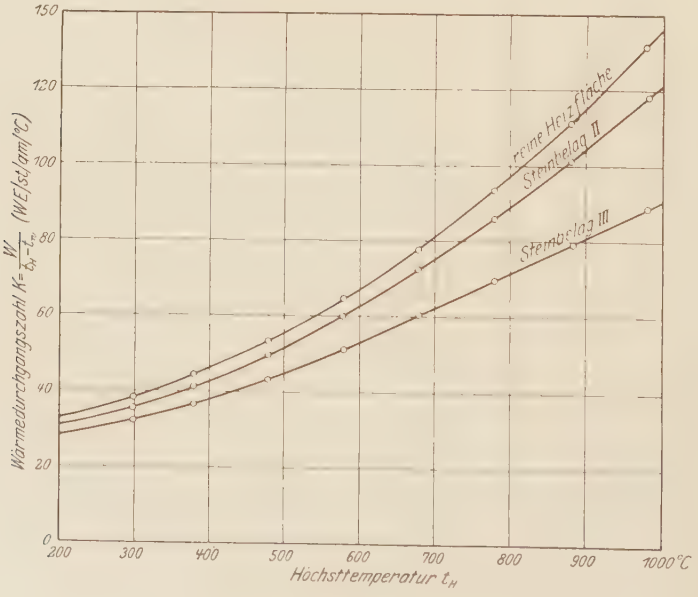

Fig. 11.

gender Höchsttemperatur ziemlich schnell. Einen ganz ähnlichen gesetzmäßigen Verlauf der Durchgangsziffern (Heizgas-Wasser) hat auf einen von dem vorliegenden ganz verschiedenartigen Weg Bräuer[1]) gefunden, indem er die Durchgangszahlen für den Wärmeübergang durch Gasmotorenzylinder an das Kühlwasser (aus Versuchen von Slaby) berechnete.

b) Ursache der Abnahme der Wärmeübertragung durch die verunreinigte Heizfläche.

Die Temperatur der bestrahlten Fläche t_a tritt sowohl für den Berührungsanteil, als auch für den Strahlungsanteil als negatives Glied auf; aus den Zahlentafeln 8, 9 und 10 und den entsprechenden Kurven für die verunreinigte Heizfläche ist bei höheren Temperaturen der das Wachsen von K hemmende Einfluß der Heizflächentemperatur deutlich erkennbar; je weniger wärmeleitend die Beläge, d. h. je höher die Blechtemperaturen sind, desto flacher verlaufen die K-Kurven beim Anwachsen der Höchsttemperatur.

Die Abnahme des Wärmedurchgangs bei Verunreinigung der Wasserseite, die sich in den kleineren Absolutwerten der Durchgangszahlen ausdrückt, ist demnach eine Folge der durch die Ablagerungen erhöhten Blechtemperatur, d. h. der dadurch eingetretenen Verminderung des Temperaturgefälles Heizgas-Blech sowie der starken Zunahme der vom bestrahlten Körper zurückgestrahlten Wärme.

2. Abschnitt.

Einfluß der Verunreinigungen auf die Verminderung des Wärmedurchgangs.

A) Berührung und Strahlung.

Die Verminderung der Wärmeübertragung durch wärmehemmende Niederschläge läßt sich unmittelbar durch die prozentuelle Abnahme der Wärmedurchgangszahlen $\zeta = \frac{K - K'}{K} \cdot 100$ ausdrücken, die bei der gleichen Höchsttemperatur durch die Verunreinigung hervorgerufen wird. Für die Wärmeübertragung durch Berührung und Strahlung ist diese Abnahme für die bei den Versuchen herrschenden Verhältnisse in Zahlentafel 11, für die abgeänderten Temperaturverhältnisse in Zahlentafel 12 aufgenommen. Die prozentuelle Verminderung bleibt den darin enthaltenen Werten zufolge nicht gleich, sondern ändert sich je nach dem Verhältnis der Größe des Strahlungsanteils zu der des Berührungsanteils mit der Höchsttemperatur.

Die Versuche und die in Anlehnung an diese geführten Berechnungen zeigen, daß Steinablagerungen von mittlerer Leitfähigkeit und 5,5 mm Stärke bei Wärmeübertragung durch gleichzeitige Berührung und Strahlung Verminderung bis zu 11 vH herbeiführen können. Bei sehr schlecht leitenden Steinen ähnlicher Stärke können diese Verluste auf 20 bis 30 vH anwachsen. Der Einfluß ölhaltiger Niederschläge zeigt sich dem Wärmedurchgang in weit höherem Maße hinderlich, die Verminderung durch den ungefähr 0,1 bis 0,2 mm starken Teeranstrich ist bereits größer als die eines 5,5 mm starken sehr schlecht leitenden Steinbelags, die eines 0,3 mm starken Teeranstrichs ist rd. $1^1/_2$ mal größer als die letztere.

[1]) Dinglers Polytechnisches Journal 1905 S. 328.

Zahlentafel 11 und 12.
Bei den Versuchen ermittelte Verminderung ζ der Wärmedurchgangszahlen.

Zahlentafel 11.

(ζ für Uebergang von Gas an Metall durch Berührung u. Strahlung; Berührungsübertragung schwach.)
$t_w = 100^0$.

1	2	3	4	5	6
Heizplatten-temperatur	Verminderung $\zeta = \frac{K - K'}{K} \cdot 100$ in vH				
^{0}C	Steinbelag I	Steinbelag II	Steinbelag III	Teeranstrich I	Teeranstrich II
300	10,2	11,5	20,9	29,3	35,6
400	9,4	11,4	19,5	25,7	35,4
500	8,5	11,2	19,0	24,1	34,4
600	7,8	10,8	19,0	18,1	34,3

Zahlentafel 12.

(Wie oben; Berührungsübertragung intensiv.)
$t_w = 180^0$.

1	2	3
Heizglatten-temperatur	ζ in vH	
^{0}C	Steinbelag II	Steinbelag III
380	6,5	17,7
480	6,5	19,1
580	6,9	20,5
680	7,0	22,5
780	8,5	25,3
880	8,9	28,9
980	11,2	33,4

B) Wärmeübertragung durch Berührung.

Bei den bisherigen Darlegungen wurde stets mit dem allgemeinsten Fall der gleichzeitigen Wärmeübertragung durch Leitung, Konvektion und Strahlung gerechnet; während der Fall der reinen Wärmestrahlung praktisch niemals auftritt, sind Wärmeübertragungsverhältnisse, bei denen der Einfluß der Strahlung vernachlässigt werden kann, ziemlich häufig.

In diesem Falle ist die Verminderung der Wärmeübertragung, die durch eine Verunreinigung der Wasserseite entsteht, nur von der Größe der Uebergangsziffer α (Wärmegeber-Heizfläche), sowie von den Faktoren abhängig, welche die Höhe der Blechtemperatur beeinflussen. Sind also, wie im vorigen Falle, diese Größen oder die zu ihrer Feststellung dienenden Werte in genügend engen Grenzen bekannt, so kann der Einfluß solcher Beläge auf die Wärmeübertragung durch Berührung ohne besondere Versuche der Größenordnung nach hinreichend genau ermittelt werden.

Es ist nach früherem

$$1)\quad W = \alpha\,(t_h - t_a)$$

$$2)\quad t_a = t_w + k\,W.$$

Der Faktor k bedeutet hierbei die reziproke Summe der Widerstände von der Blechaußenfläche bis zum Wasser und ist für die untersuchten Beläge aus den Gl. (V) bis (VII) S. 27 zu entnehmen. Durch Elimination von t_a findet man

$$\frac{W}{t_h - t_w} = K = \frac{\alpha}{1 + \alpha\,k} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(VIII)}.$$

Da sich α erfahrungsgemäß mit der Temperatur nur wenig ändert und nur wesentlich vom Bewegungszustand des Wärmegebers abhängt, so wird unter den gleichen Heizungsverhältnissen die Verminderung des Wärmedurchgangs durch einen Belag innerhalb eines weiten Temperaturgebietes unverändert bleiben.

Gl. (VIII) läßt erkennen, daß für den gleichen Widerstand k auf der Wasserseite die Größe der Durchgangszahlen K lediglich von der Größe der Wärmeübertragung an die Heizfläche abhängt, also mit α in weiten Grenzen schwanken kann (klein bei Gas, groß bei Sattdampf und Flüssigkeit).

Das Verhältnis der Durchgangszahlen $\frac{K}{K'}$ bei reiner und verunreinigter Heizfläche berechnet sich unter den gleichen Berührungs- und Uebertragungsverhältnissen nach Mollier[1]) aus der leicht ableitbaren Beziehung

$$\frac{K'}{K} = \frac{1}{1 + \frac{\delta'}{\lambda'} K},$$

welche aussagt, daß der schädliche Einfluß einer Verunreinigung mit der Größe der Wärmeübertragung bei reiner Heizfläche (K) anwächst.

a) Heizgas als Wärmeträger.

Wird zunächst α_l für Uebertragung von Heizgas an Metall unverändert $= 20$ gesetzt, so ergeben sich für die betrachteten Steinbeläge die in Zahlentafel 13 enthaltenen Durchgangzahlen und Verminderungsziffern: die Abnahme des Durchgangs beträgt nur 1,4 vH bei dem Steinbelag 1, 3,5 vH bei Steinbelag 2 und 9,7 vH für den Belag gleicher Stärke und der Leitfähigkeit 1. Der Einfluß einer Veränderung der Uebergangsziffer α_l innerhalb der wahrscheinlichen Grenzen 10 bis 25 ist in Zahlentafel 14 enthalten. Die prozentuelle Verlustzahl ζ steigt in dem angegebenen Gebiet von 1,8 auf 3,9 vH bei dem gut leitenden und von 5,2 auf 11,4 vH bei dem schlecht leitenden Stein.

Zahlentafel 13.

Wärmeübergang Gas — Metall durch Berührung.

($\alpha_l = 20$.)

	1	2
Zustand der Heizfläche	Durchgangszahl	Verminderung ζ
rein	19,52	—
Steinbelag I . . .	19,24*)	1,4
Steinbelag II . .	18,84	3,5
Steinbelag III . .	17,63	9,7

*) für Steinbelag I ist $k = 0{,}001998$.

Zahlentafel 14.

Einfluß der Veränderung von α_l:

1	2	3	4	5	6
Uebergangsziffer α_l	Durchgangszahl K			Verminderung ζ in vH	
	reine Fläche	Steinbelag II	Steinbelag III	Steinbelag II	Steinbelag III
10	9,88	9,70	9,37	1,8	5,2
15	14,73	14,34	13,63	2,6	7,7
20	19,52	18,84	17,63	3,5	9,7
25	24,14	23,21	21,40	3,9	11,4

[1]) Mollier, Hütte 1908 S. 310.

Ein Vergleich dieser prozentuellen Verlustziffern mit denen, die sich bei gleichzeitiger Uebertragung durch Strahlung und Berührung gefunden haben, zeigt, daß die schädliche Wirkung bei Berührungsübertragung von Gas an Metall wesentlich kleiner ist, der prozentuelle Verlust beträgt durchschnittlich rd. ein Drittel der oben festgestellten Ziffern und überschreitet im ungünstigsten Falle 12 vH nicht[1]).

b) Sattdampf oder Flüssigkeit als Wärmeleiter.

1) Mäßiger Wärmeübergang.

Die Durchgangzahlen K und mit ihnen der schädliche Einfluß wärmehemmender Krusten bei Berührungsübertragung nehmen jedoch ganz andre Größen an, sobald Wasser oder gesättigter Dampf als Wärmegeber auftritt, da in diesem Falle die Uebergangzahl α_l 100 bis 300mal größer ist als bei Heizgas. Für Werte von $\alpha_l = 1000$ (ruhendes Wasser oder Dampf) bis $\alpha_l = 6000$ (lebhafte Bewegung) ergeben sich für die bisher betrachteten Ablagerungen, sowie für die reine Heizfläche die in Zahlentafel 15 enthaltenen Durchgangzahlen und Wärmeverlustziffern; bei Berechnung dieser Werte wurde der Uebergangswiderstand $\frac{1}{\alpha_w}$, der in k enthalten ist, genau wie bei den Versuchen angenommen, also für wenig bewegtes Wasser. Bei der betrachteten Uebertragungsart kann demnach ein ziemlich gut leitender 5,5 mm starker Stein je nach dem Bewegungszustand der Wärmeträger, eine Abnahme der Uebertragung von 45 bis 57 vH, ein sehr schlecht leitender Stein im ungünstigsten Fall eine solche von annähernd 80 vH hervorrufen. Die Größenordnung der hier berechneten Verluste wird durch unten zu besprechende Versuche vollkommen bestätigt.

Zahlentafel 15.

Wärmeübergang Sattdampf — Metall.

1	2	3	4	5	6
Uebergangszahl α_l	Durchgangszahlen			Verminderung ζ in vV	
	reine Heizfläche K	Steinbelag II K''	Steinbelag III K'''	Steinbelag II	Steinbelag III
1000	449,4	245,1	129,5	45,5	71,2
2000	579,4	279,3	138,4	51,7	76,1
3000	641,7	293,0	141,7	54,3	78,0
4000	678,0	300,3	143,4	55,5	78,9
5000	701,8	304,9	144,4	56,6	79,4
6000	718,5	308,0	145,1	57,1	79,8

2) Gesteigerter Wärmeübergang.

Die bisher gefundenen Werte der Durchgangzahlen entsprechen Uebertragungsverhältnissen, bei denen der Bewegungszustand beider Wärmeträger in derartigen Grenzen bleibt, daß für ihre Beurteilung die bei den oben erwähnten Laboratoriumsversuchen gefundenen Werte von α_l und α_w Verwendung finden konnten. Für Heizflächen, an denen noch größere Wärmeübergänge

[1]) Bei dieser Ableitung brauchte die Rückstrahlung der Heizfläche, die den Hauptgrund für die schnelle Abnahme des Wärmedurchgangs bei der Strahlungsübertragung bildet, nicht berücksichtigt werden, da in fast allen Fällen der Berührungsübertragung jeder Teil der Heizfläche einem gleichtemperierten gegenüberliegt (Röhren), also ebenso viel Wärme zugestrahlt erhält, als er ausstrahlt; überdies bleiben die Blechtemperaturen bedeutend niedriger, da durch Berührung von Heizgas höchstens 25 bis 30 000 WE/st/qm übertragen werden können, während eine strahlende Heizung über 100 000 WE stündlich durch 1 qm Heizfläche senden kann.

stattfinden, sind diese Werte nicht mehr allein maßgebend und es sollen daher zur Beurteilung der Wirkung von Krusten in derartigen Fällen auch die in der Praxis gewonnenen Erfahrungsgrößen herangezogen werden.

Größe der Durchgangzahlen bei reiner Heizfläche.

Findet der Wärmeübergang von mäßig bewegtem Dampf durch Kupferböden an siedende, stark wallende oder mittels Rührwerk bewegte Flüssigkeit statt, so finden sich nach Hausbrand[1]) Durchgangzahlen K von 1300 bis 3300 (die Erfahrungen, die durch Versuche des B. R. V.[2]) an Braupfannen gesammelt wurden, decken sich mit diesen Werten). Bedeutend erhöht wird die Intensität der Berührungsübertragung noch, wenn dafür gesorgt wird, daß immer neue Dampfteile in lebhafter Bewegung an die Heizfläche prallen; dies ist der Fall, wenn der Dampf nicht in breitem Strom durch die Heizräume dringt, sondern in engen Röhren, die er mit großer Geschwindigkeit durchströmt, sozusagen in Strahlen unterteilt, seine Wärme abgibt. Für den Wärmeübergang von Dampf durch Heizrohre an siedendes Wasser stellt Hausbrand nach den von Mollier[3]) mitgeteilten einschlägigen Versuchen, sowie nach Versuchen von Jelinek[4]) und nach eigenen Beobachtungen die empirische Annäherungsformel auf $K = \frac{1900}{\sqrt{l\,d}}$[5]).

Unter Benutzung dieser Formel und in Einklang mit sonstigen Beobachtungen findet Hausbrand für dünnwandige Kupferrohre von 2 m Länge Werte für K von 3400 (150 mm l. W.) bis $K = 13470$ (10 mm l. W.); bei Vergrößerung der Rohrlänge bis zu 30 m sinken diese Werte auf $K = 950$ bezw. 3570. Für schmiedeiserne Rohre gelten unter Berücksichtigung der Wandstärke etwa $^3/_4$ dieser Werte.

Durchgangsverlust bei hoher Wärmeübertragung.

Es soll unter Zugrundelegung der angeführten Werte von K für eine derart hohe Wärmeübertragung untersucht werden, wie weit die Wirksamkeit der Heizfläche durch einen schlecht leitenden Steinbelag von einer der Rohrwandstärke gleichen Dicke herabgesetzt wird.

Unter Anwendung der Formel

$$\frac{K'}{K} = \frac{1}{1 + \frac{\delta'}{\lambda'} K}$$ [6])

ergibt sich für das gänzlich inkrustierte Kupferrohr von 10 mm l. W. bei 2 m Länge ein Verhältnis von $\frac{K}{K'} = 26$, also ein Verlust von $\zeta = 96$ vH und bei 30 m Länge $\frac{K}{K'} = 8{,}14$, oder $\zeta = 88$ vH. Für das Rohr mit 150 mm l. W. ergibt sich bei 2 m Länge $\zeta = 87$ vH und bei 30 m Länge $\zeta = 65$ vH. Der betrachtete Stein, der in Stärke und Leitfähigkeit praktisch normalen Verhältnissen entspricht, wird demnach die Heizfläche eines aus kurzen engen Röhren bestehenden Heizkörpers fast gänzlich unwirksam machen, für mittlere Rohrdurchmesser wird im Mittel eine Verminderung der Durchgangzahlen um 80 vH eintreten.

---

[1]) Verdampfen, Kondensieren und Kühlen 1904 S. 54.

[2]) Zeitschrift des B. R. V. 1902 S. 48.

[3]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897 S. 153 u. f.

[4]) Zeitschrift des Vereines für Rübenzuckerindustrie 1894, Dez.

[5]) l = Länge in m, d = Durchmesser in m.

[6]) Bei der in Betracht kommenden Schichtstärke der Verunreinigungen kann diese für ebene Platten abgeleitete Formel ohne merklichen Fehler auch für zylindrische Röhren verwendet werden.

3. Abschnitt.

Einfluß auf die Wärmeausnutzung in Heizvorrichtungen.

In den bisherigen Betrachtungen über den Einfluß schlecht wärmeleitender Ablagerungen auf den Wärmedurchgang durch Heizflächen, die als Endergebnis die für die verschiedenen Uebertragungsverhältnisse jeweils charakteristische Größenordnung der durch einen Belag zu erwartenden prozentuellen Abnahme der Durchgangszahlen $\zeta = \frac{K-K'}{K}\,100$ lieferten, sind in der Weise entwickelt worden, daß die für einen Wert von ζ zusammengehörigen Werte K und K' sich auf den gleichen Gesamttemperaturunterschied bezogen. Zum Vergleich der Wärmeausnutzung in reinen und verunreinigten Wärmeübertragungsvorrichtungen (unter Wärmeausnutzung ist hier das prozentuelle Verhältnis der durch die Heizfläche transmittierten zu der derselben zugeführten Wärmemenge zu verstehen) können die gefundenen Werte nur da unmittelbar herangezogen werden, wo sowohl die Temperatur des Wärmegebers, als auch die des Wärmeempfängers, und damit auch der Temperaturunterschied, über die ganze Fläche der Heizvorrichtung praktisch unverändert bleibt; im allgemeinen werden jedoch entweder Wärmegeber und Wärmenehmer oder wenigstens einer der beiden Körper ihre Temperatur beim Bestreichen der Heizflächen stetig ändern und mit ihnen sowohl die jeweilige Uebergangszahl K als auch der Temperaturunterschied ϑ an den einzelnen Stellen der Heizfläche verschiedene Werte annehmen.

Um unter diesen verwickelten Verhältnissen, die sich bei der Betrachtung praktisch auftretender Fälle durch Hinzutreten neuer Variabler noch weniger einfach gestalten, einen Vergleich der Wärmeausnutzung in Vorrichtungen mit reiner und verunreinigter Heizfläche anstellen zu können, sind zunächst die Gesetze zu untersuchen, nach denen sich K und ϑ der Heizfläche entlang ändern, d. h. K und ϑ sind als Funktionen der jeweils bestrichenen Fläche F auszudrücken.

Allgemeine Lösung.

a) Explizite Form.

Ist $K = f(F)$ und $\vartheta = \varphi(F)$, so ist die zwischen den Stellen F_0 und F_1 übertragene Wärme Q in der Zeiteinheit

$$Q = K_m\,\vartheta_m\,(F_1 - F_0) = \frac{\int_{F_0}^{F_1} f(F)\,\varphi(F)\,dF}{\int_{F_0}^{F_1} dF} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(I)},$$

wenn K_m und ϑ_m Mittelwerte zwischen F_0 und F_1 bedeuten; ebenso wird für die verunreinigte Fläche in denselben Grenzen

$$Q' = \frac{\int_{F_0}^{F_1} f'(F)\,\varphi'(F)\,dF}{\int_{F_0}^{F_1} dF} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \text{(II)}.$$

Die gesuchte prozentuelle Abnahme der Wärmeausnutzung ε ist dann, gleiche Anfangsbedingungen vorausgesetzt,

$$\varepsilon = \frac{Q - Q'}{Q}\,100.$$

b) Implizite Form.

Ist die Aenderung der Durchgangszahlen längs der bestrichenen Fläche nicht direkt als Funktion der letzteren gegeben, sondern, wie dies z. B. bei den durch die Versuche gefundenen Gesetzmäßigkeiten der Fall ist, als Funktion der Temperatur des Wärmeträgers, ist also

$$\text{a)}\ K = f(t_h); \qquad \text{b)}\ t_h = \varphi(F),$$

so kann die Temperatur am Ende der Heizfläche mit Hülfe dieser beiden beiden Beziehungen gefunden werden: $t_e = \psi(K, F)_e$. Ist G das Gewicht der stündlich vorbeiströmenden Heizgase, c die mittlere spezifische Wärme derselben am Ende der Heizfläche, W_e deren Wärmeinhalt am Ende der Heizfläche und W_a die am Beginn derselben zur Verfügung stehende Wärmemenge, dann ist der Wärmeinhalt am Ende

$W_e = t_e G c$ bei reiner Heizfläche,
$W_e' = t_e' G c'$ » unreiner » ,

ferner

$(W_a - W_e)$ die bei reiner Heizfläche übertragene Wärme,
$(W_a - W_e')$ » » unreiner » » » .

Es ergibt sich der Verlust an Wärmeausnutzung in vH zu $\varepsilon = \frac{W_e' - W_e}{W_a - W_e}\ 100$.

Bezeichnet in folgendem:

t_1 die Temperatur des wärmeliefernden Körpers,
t_2 » » » wärmeaufnehmenden Körpers,
(t_a-Temperatur am Anfang der Heizfläche),
(t_e- » » Ende » »),

so sind die folgenden 4 Hauptfälle bei Untersuchung der für die Ablagerung von Kesselstein in Betracht kommenden Heizflächen zu unterscheiden.

1) t_1 unveränderlich, t_2 unveränderlich,
2) t_1 unveränderlich, t_2 veränderlich,
3) t_1 veränderlich, t_2 unveränderlich,
4) t_1 veränderlich, t_2 veränderlich.

1. Fall: t_1 unveränderlich; t_2 unveränderlich.

Die Bedingung gleichbleibender Temperatur der beiden durch Vermittlung der Heizflächen in Wärmeaustausch tretenden Körper und damit die unveränderlichen Temperaturunterschiedes über die ganze Heizfläche ist erfüllt bei der Wärmeübertragung von gesättigtem Dampf an siedende Flüssigkeiten, wenn als Heizflächen entweder Rohrleitungen, deren Abmessungen nur einen sehr geringen, die Dampftemperatur nicht wesentlich beeinflussenden Spannungsabfall zulassen, ferner weite Heizmäntel oder Doppelböden angeordnet sind; den zu Beginn dieses Abschnittes angestellten Ausführungen zufolge bilden für den Fall unveränderlichen Temperaturunterschiedes die im vorigen Kapitel festgestellten Werte ζ für die Abnahme der Durchgangzahlen einen unmittelbaren Maßstab für die durch einen Belag hervorgerufenen Verminderung der Wärmeausnutzung in der Heizvorrichtung. Gute Entlüftung und Entwässerung der Heizräume, und damit eine wirkliche Berührung des Dampfes mit der Heizfläche vorausgesetzt, können daher für den Fall des Beharrungszustandes unmittelbar die im letzten Kapitel für den Wärmeübergang durch Berührung von Dampf an Wasser gefundenen Werte ζ als Verlustwerte ε angenommen werden. Demzufolge können für derartige Heizvorrichtungen bei 5,5 mm starken Steinbelagen von mittlerer Leitfähigkeit bis zu 60 vH, bei sehr schlecht leitendem Stein von

der gleichen Stärke bis zu 80 vH Verluste in der Wärmeausnützung, d. h. in diesem Falle Steigerung des Dampfverbrauchs eintreten. Da in geordneten Betrieben, in denen überhaupt eine Kontrolle des Dampfverbrauchs für die einzelnen Fabrikationszwecke ausgeübt wird, das Ansetzen derart starker Steinschichten niemals zugelassen wird, so stehen dem Verfasser nur Versuchserfahrungen mit bedeutend dünneren Belägen zur Verfügung; die Größe der bereits durch diese verursachten Verluste bestätigt jedoch vollkommen die Richtigkeit der angestellten Berechnungen.

Beispiele.

Heizvorrichtungen, in denen meist hartes Wasser zum Verdampfen gebracht wird und die der Bedingung der Temperaturkonstanz zu beiden Seiten der Heizfläche genügen, sind die mit Doppelböden versehenen Sudpfannen der für Dampfkochung eingerichteten Bierbrauereien; auf dem Pfannenboden setzt sich erfahrungsgemäß schon nach sehr kurzen Betriebsperioden ein Steinbelag, der sogenannte »Bierstein«, ab, der gewöhnlich nach jeder Kochung mittels Stahlschropper entfernt wird.

Beobachtungen in einer Münchener Großbrauerei, in der die Pfannenreinigung während einiger Sude unterblieb, ergaben bei einem Steinbelag von nur rd. 0,3 mm Stärke (und einer bei Münchener Wasser ziemlich guten Leitfähigkeit) eine Verlängerung der für gleiche Eindampfleistung und bei gleicher Dampftemperatur benötigten Kochdauer von $2^1/_2$ st um eine Viertelstunde, d. h. in Anbetracht der Beziehung $Q = K F z (t_1 - t_2)$ eine Verminderung von K um **10 vH** gegenüber dem Betrieb mit blanken Pfannenboden.

Nach den Mitteilungen einer badischen Brauerei, die mit sehr hartem Wasser arbeitet und in welcher die Bodenreinigung bis zum Ansatz eines Belages von ungefähr 2 mm Stärke unterlassen wurde, wurden folgende Dampfverbrauchsziffern bei einer Kochung mit diesem Belag und einer sich anschließenden nach vorher erfolgter Reinigung bei gleicher Dampftemperatur festgestellt:

Dampfverbrauch vor der Reinigung:

Zum Einkochen von 2000 l [10^{05} bis 1^{40}] 3000 kg Dampf.

Dampfverbrauch nach der Reinigung:

Zum Einkochen von 1900 l [10^{05} bis 1^{40}] 1953 kg Dampf.

Die Wärmeübertragung ist demnach bei einem Belag von nur rd. ein Drittel der Stärke, wie sie den früheren Berechnungen zugrunde gelegt wurde, bereits mehr als 30 vH gesunken.

2. Fall: t_1 unveränderlich; t_2 veränderlich.

Als Heizvorrichtungen, in denen die Temperatur des wärmeliefernden Körpers über die ganze Heizfläche nahezu dieselbe bleibt, während der wärmeaufnehmende seine Temperatur beim Bestreichen der Heizfläche ändert, sind die zur Warmwasserbereitung dienenden mit Sattdampf geheizten Röhrenvorwärmer zu betrachten, sofern in dem mit Frischdampf oder Maschinenabdampf geheizten Rohrsystem ein merklicher Spannungs- und damit Temperaturabfall nicht eintritt, ferner Oberflächenkondensatoren und ähnliche Kühlanordnungen. Nachdem in diesen Fällen der Temperaturunterschied längs der Heizfläche nicht gleich bleibt, ist zum Vergleich der durch die reinen und unreinen Heizflächen geströmten Wärmemengen der oben angegebene allgemeine Lösungsweg zu beschreiten, d. h. es sind zunächst die Gesetze der Aenderung von K und ϑ längs der Heizfläche zu untersuchen.

Da in den in Betracht zu ziehenden Fällen die Wärmeübertragung an die Heizfläche fast ausschließlich durch Berührung erfolgt, so ist nach früherem (S. 30) die Durchgangszahl $K = \frac{\alpha_l}{1 + \alpha_l k}$ [1]), also von dem Temperaturunterschied im wesentlichen unabhängig, und gleichen Bewegungszustand des Heizmittels an der ganzen Fläche vorausgesetzt, kann für K die einfache Beziehung $\frac{d K}{d \vartheta} = 0$ oder $K = \text{konst} = K_m$ in die Berechnung eingesetzt werden.

Die Aenderung der Temperatur t_2 stellt unmittelbar die Aenderung des Temperaturunterschiedes ϑ dar, es ist $\frac{d t_2}{d F} = \frac{d \vartheta}{d F}$. Bezeichnet G das in der Zeiteinheit erwärmte Flüssigkeitsgewicht und c dessen spezifische Wärme, so findet man für das Temperaturgefälle an der Stelle F_1 die leicht ableitbare Beziehung:

$$\vartheta_{F1} = \vartheta_a e^{-(F - F_a)\frac{K}{G c}} \text{ [2])} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1).$$

Für den mittleren Temperaturunterschied ϑ_m zwischen Anfang und Ende der Heizfläche findet man die Beziehung:

$$\vartheta_m = \frac{t_{2e} - t_{2a}}{\ln \vartheta_e - \ln \vartheta_a} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2).$$

Aus Gl. (1) und (2) ergibt sich demnach die durch die reine Heizfläche geströmte Wärme zu

$$Q = F z K_m \frac{t_{2e} - t_{2a}}{\ln \vartheta_e - \ln \vartheta_a} = G c (t_{2e} - t_{2a}). \quad \ldots \ldots \ldots \quad (3).$$

Für die verunreinigte Heizfläche ändert sich in diesem Ausdruck K in K', ebenso nehmen t und ϑ andere Werte an; über die Größe dieser Aenderungen und damit der Aenderung der Wärmeübertragung sollen einige Beispiele Aufschluß geben.

Beispiele:

Es sei zunächst, um einen unmittelbaren Vergleich des Einflusses des veränderlichen Temperaturunterschiedes auf den Verlust ε mit dem entsprechenden Verlustwert ζ zu haben, sowie um den Einfluß der Heizflächengröße zu zeigen, der einfache Fall betrachtet, daß sich Wasser im Vorüberstreichen an einer dampfgeheizten Fläche von der Stärke der Versuchsheizfläche erwärmt. Die Werte der Durchgangszahl K und K' können für die einzelnen Bewegungszustände, also verschiedene Werte von α_l, direkt der Zahlentafel 15 entnommen werden. Es werde der Fall des schlecht leitenden 5,5 mm starken Steinbelages ($\lambda = 1$) betrachtet; die Dampftemperatur betrage unverändert 100°. K wird dann 718,5, $K' = 145{,}1$ ($\zeta = 78{,}9$ vH); das Wasser fließe mit der Temperatur 10° zu und es seien stündlich 3000 kg auf 40, 60, 80 und nahezu 100° zu erwärmen.

Die für gleiche Wassermengen und gleiche Zeiten hierzu nötigen Heizflächen bei reinem Blech sind nach Formel (3) berechnet und in Spalte 1 der Zahlentafel 16 enthalten. Die nach Bestreichen der verunreinigten Heizflächen gleicher Größe für die gleiche Wassermenge erreichten Endtemperaturen sind in Spalte 3, die entsprechenden Verluste an Wärmeausnutzung in Spalte 7 zusammengestellt. Die Ergebnisse der Durchrechnung dieses einfachen Beispieles sind der Wichtigkeit ihrer Verallgemeinerung halber in Fig. 12 zeichnerisch dargestellt.

[1]) α_l = Uebergangziffer von Heizgas an Blech.

[2]) Lorenz, Technische Wärmelehre 1904 S. 450

Zahlentafel 16.

Wärmeausnutzungsverlust ε.

Wärmeübergang von Sattdampf ($t_1 = \text{const} = 100^0$) an Wasser ($t_a = 10^0$).

($K = 718{,}5$; $K' = 145{,}1$; $\zeta = 78{,}9$ vH.)

1	2	3	4	5	6	7
bestrichene Heizfläche	Temperatur des Wassers am Ende des Heizflächenabschnittes bei der		mittlerer Temperaturunterschied von Anfang der Heizfläche bis zum Ende des Abschnittes bei der		Erhöhung des mittleren Temperaturunterschiedes durch den Belag	Wärmeausnutzungsverlust ε
	reinen Heizfl.	belegt. Heizfl.	reinen Heizfl.	belegt. Heizfl.		
qm	^{0}C	^{0}C	^{0}C	^{0}C	vH	vH
1,69	40	17,0	74,3	87,0	17,9	76,5
3,37	60	23,5	62,1	82,9	33,5	73,0
6,25	80	33,4	46,7	77,9	66,7	66,8
16,25	98	58,9	22,6	62,7	177,5	44,5

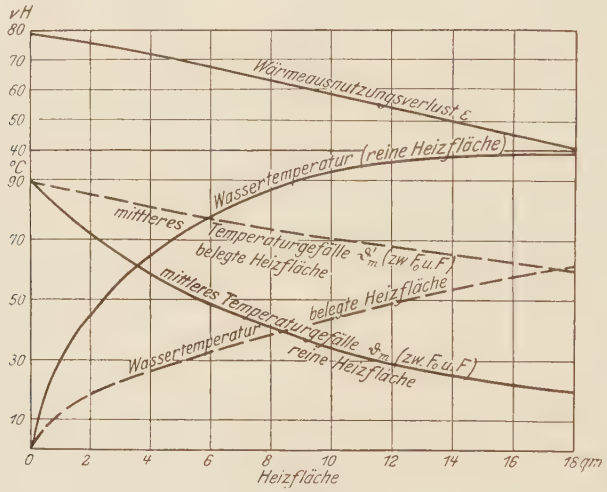

Fig. 12.

Es zeigt sich hier die für alle Heizvorrichtungen, in denen eine der als Wärmeträger dienenden Flüssigkeiten oder alle beide ihre Temperatur längs der Heizfläche verändern, charakteristische Erscheinung, daß der Verlust an Wärmeausnutzung ε nie die Höhe der früher festgestellten Abnahme der Wärmedurchgangszahlen ζ erreicht, sondern unter Umständen dieselbe bedeutend unterschreiten kann.

Ein Vergleich der Spalten 4 und 5 der Zahlentafel 16 zeigt den Grund dieser für die Beurteilung der Wirkung von Steinbelägen höchst wichtigen Eigenschaft. Bei dem verunreinigten Blech nimmt in den ersten Teilen der Heizfläche das Wasser wegen der kleineren Durchgangszahl K' weniger Wärme auf, als bei reiner Heizfläche, es bleibt demnach kälter, und der Temperaturunterschied wird in den nächsten Teilen der Heizfläche größer, als bei reinem Blech. Dieser Unterschied in der Temperaturdifferenz steigt mit wachsender Heizfläche, so daß, wie aus Zahlentafel 16 hervorgeht, der mittlere Temperaturunterschied bei verunreinigtem Blech gegenüber dem bei reiner Fläche prozentuell um so größer wird, je länger der Weg der Flüssigkeit ist, d. h. je mehr Heizfläche zur Verfügung steht. Durch den höheren mittleren Temperaturunter-

schied, den einen Faktor in der Wärmegleichung, wird die Wirkung des anderen Faktors, des gegenüber reiner Fläche kleineren K_m zum Teil ausgeglichen, so daß in den weitaus meisten Fällen der Rückgang der Wärmeausnutzung niemals jene hohen Werte annimmt, wie sie im vorigen Kapitel für die Abnahme der Wärmedurchgangszahlen bei Berührungsübertragung berechnet wurden.

Wie weit diese Herabminderung der Verluste sich bei ausgeführten Heizvorrichtungen erstreckt, sei an den folgenden Beispielen zweier Abdampfvorwärmer gleicher Konstruktion aber verschieden großer Heizfläche untersucht, für welche die Wärmedurchgangszahlen in reinem Zustand durch Versuche [1]) festgestellt wurden.

Beispiele: Ausgeführte Heizvorrichtungen.

1) Vorwärmer von 100 qm Heizfläche, Dampf von 100° strömte in einem wagerechten, zylindrischen Gefäß im Zickzack um wagerechte Messingrohre von 50 mm l. W., durch die das zu erwärmende Wasser fließt. Das ablaufende Kondensat hatte ebenfalls 100°, die Zulauftemperatur des Wassers betrug 120°, es wurden in der Stunde 9530 kg auf 95° erwärmt; K berechnet sich nach Gl. (1) demnach zu 273.

Ein auf den Messingrohren haftender, schlecht leitender Steinbelag von 3 mm Stärke hätte früheren Ausführungen zufolge (vgl. S. 31) eine Verschlechterung von K zu $K' = 150$ zur Folge gehabt, also $\zeta = 45$ vH; mit dem Werte K' findet sich der Endtemperaturunterschied nach Gl. (1) zu $\vartheta_e = 18{,}2°$, die Endtemperatur des Wassers zu 81,8°; der Verlust der Wärmeausnutzung ε betrüge demnach nur 10,9 vH (gegenüber $\zeta = 45$ vH).

2) In einem Vorwärmer gleicher Bauart, aber von nur 66 qm Heizfläche, wurden stündlich 10576 l Wasser von 60° auf 95° durch Heißdampf von 100° erwärmt, der ebenfalls mit 100° austrat; daraus berechnet sich K zu 329.

Der gleiche Steinbelag wie vorher liefert $K' = 165$, also $\zeta = 50$ vH; die Endtemperatur des Wassers findet sich zu 85,7°, der Verlust an Wärmeausnutzung ε beträgt hier 26,6 vH.

Während also im ersten Falle der prozentuelle Verlust an Wärmeausnutzung nur 35 vH der Verminderung von K betrug, war dieser Verlust bei Verkleinerung der Heizfläche um ein Drittel bereits auf 53 vH von ζ angewachsen.

Allgemein läßt sich, wie aus den Beispielen ersichtlich, die Größe des durch einen Steinbelag zu erwartenden Verlustes an Wärmeausnutzung für die unter Fall 2 einzubeziehenden Heizvorrichtungen (Dampfheizrohre, Oberflächen- und Rieselkondensatoren usw.) nicht genau angeben, da derselbe je nach der Größe des einzelnen Apparates wechselt, doch ist es nach dem hier geschilderten Verfahren für jeden einzelnen Fall leicht möglich, die zu erwartenden Verluste in ziemlich enge Grenzen einzuschließen. Im großen ganzen werden bei nicht allzustarken Belägen und bei Heizvorrichtungen mittlerer Abmessung die Verluste ε 15 bis 30 vH betragen, bei kleinen Heizflächen oder besonders hohen Durchgangszahlen K (kurze enge Heizrohre) kann die Wärmeausnutzung bis auf 50 vH der bei reinen Flächen erzielten sinken.

[1]) Hausbrand: Verdampfen, Kondensieren und Kühlen 1904 S. 296.

3. Fall: t_1 veränderlich, t_2 unveränderlich.

a) Wärmeträger: Dampf und Flüssigkeit.

In allen Vorrichtungen, in denen gespannter Dampf nicht nur, wie bisher betrachtet, seine Verdampfungswärme durch Kondensation abgibt, sondern längs der Heizfläche einen Spannungs- und Temperaturabfall erleidet, ebenso bei Wärmeübertragung von heißen Flüssigkeiten an siedende Lösungen, sind die Bedingungen variabler Temperatur des Heizmediums und konstanter Temperatur des geheizten erfüllt. Die Größenordnung der Durchgangszahlen K ist für diese beiden Fälle die gleiche, wie für die unter Fall 2 betrachteten Verhältnisse. Die beiden Fälle unterscheiden sich nur dadurch, daß dort der Wärmenehmer und hier der Wärmegeber seine Temperatur längs der Heizfläche ändert. Der sich an irgend einem Teil der Heizfläche einstellende Temperaturunterschied ist aber, wie aus Gl. (1) hervorgeht, bei gegebenen Anfangsbedingungen nur vom Absolutwerte K abhängig, so daß es für die Betrachtung gleichgültig ist, welcher der beiden Körper seine Temperatur ändert. Die Wärmeausnutzungsverluste, die durch Ablagerungen beim Wärmeaustausch in den unter 3 bisher geschilderten Verhältnissen hervorgerufen werden, sind demnach von der gleichen Größenordnung wie die unter Fall 2 betrachteten.

b) Wärmeträger: Gase.

In den bisher besprochenen Heizvorrichtungen mußten die wärmeabgebenden Körper (Dampf oder Heizflüssigkeiten) ihrerseits die in ihnen enthaltene Eigenwärme in anderen primären Heizvorrichtungen zugeführt erhalten. Mit Ausnahme verschwindend weniger Fälle erfolgt die primäre Wärmeerzeugung durch Ausnutzung der bei der Verbrennung fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe entstehenden Wärmetönung, indem die freiwerdende Wärme teils durch direkte und indirekte Strahlung von seiten der Brennstoffschicht und der Flammen, teils durch Konvektion, Leitung und Strahlung der gasförmigen, weiter abgekühlten Verbrennungsprodukte an die Heizfläche übertragen wird.

Alle derartigen Wärmeübertragungsvorrichtungen, die ihrer großen Bedeutung für die Heizungstechnik halber besonders eingehende Beachtung verdienen, haben, sofern sie zur Verdampfung von Wasser verwendet werden, die für den Fall 3 grundlegenden Eigenschaften gemeinsam, und bei Verwendung ungereinigten Wassers sämtlich unter der Ablagerung von Härtebildnern auf den Heizflächen zu leiden. Bevor zur allgemeinen Betrachtung der in den Hauptrepräsentanten dieser Gruppe, in den Dampfkesseln, auftretenden Einflüsse von Niederschlägen auf die Wärmeausnutzung geschritten wird, seien, um zunächst eine zu große Komplikation der Berechnung zu vermeiden, die Wärmeübergangsverhältnisse, wie sie in Dampfkesseln kombiniert auftreten, vorerst getrennt an einfachen charakteristischen Fällen beleuchtet, die möglichst den praktisch auftretenden Betriebsverhältnissen angepaßt sind. An Hand dieser Beispiele wird der Einfluß der verschiedenen, in Betracht kommenden Faktoren einzeln festgestellt werden, um schließlich ein Bild über den Einfluß des gleichzeitigen Zusammenwirkens derselben zu erhalten.

Zuerst sei der einfache Fall betrachtet, daß die Wärme von Heizgas durch Heizrohre an siedendes Wasser nur durch Konvektion und Leitung übertragen wird, daß die Strahlung des Gases also für die Berechnung vernachlässigt werden kann. Die Wärmestrahlung eines Oberflächenteiles eines Gases

ist nach Versuchen von W. Siemens[1]) und R. von Helmholtz[2]) quantitativ bedeutend geringer, als die von einer gleichen Fläche eines festen Körpers ausgehende Energie; nicht leuchtende Flammen strahlen außerdem ungefähr nur ein Drittel so stark als leuchtende. Außer diesem quantitativ geringeren Emissionsvermögen, das mit der Temperatur sehr schnell sinkt, erstrecken sich die von Gasen ausgehenden Wärmestrahlen nur über ein geringes Gebiet des Spektrums[3]), im Gegensatz zu festen Körpern, die Wellen der verschiedensten Längen aussenden. Da die bestrahlte Heizfläche, wie jeder Körper, ein selektives Absorptionsvermögen besitzt, d. h. nur Strahlen bestimmter Wellenlängen an der Oberfläche in Wärme verwandelt, so wird sie im allgemeinen von der Gasstrahlung, die ihr nur wenig verschiedene Wellenlängen zusendet, auch weniger absorbieren, als von der »farbenreicheren« Strahlung fester Körper. Unter Berücksichtigung dieses quantitativ und qualitativ geringeren Strahlungsvermögens der Gase erscheint es gerechtfertigt, für die Berechnung die strahlende Wärmeübertragung der Gase schon bei Temperaturen zu vernachlässigen, wo feste Körper noch merklich strahlende Wärme aussenden; in Rohren, wo die gegenüberliegenden Wandungen gleich temperiert sind, die Strahlung derselben also nicht zur Geltung kommt, kann bei Gasheizung mit reiner Berührungsübertragung gerechnet werden.

Es werden durch ein Heizrohrbündel, etwa den Oberkessel eines Doppelkessels, stündlich 4000 kg Heizgase mit der Anfangstemperatur 500° und der zunächst als konstant angenommenen spezifischen Wärme $c_p = 0{,}25$ gesandt. Nach dem obigen können wir in diesem Falle mit reiner Berührungsübertragung rechnen. Die für die Wärmeübertragung von Heizgas durch Blech an siedendes Wasser von 100° früher festgestellten Durchgangszahlen lagen zwischen 10 und 25 (für normale Geschwindigkeit); für den betrachtenden Fall werde $\alpha_i = 20$ angenommen, wofür sich aus Zahlentafel 13 für K der Wert 19,5 und bei einem Steinbelag von 5,5 mm und $\lambda = 1$ K' zu 17,6 ergab; ζ beträgt demnach 9,7 vH. Es soll nun im gegebenen Falle die Größe der durch den Belag erfolgenden Verminderung der Wärmeausnutzung ε und namentlich der Einfluß der Heizflächenausdehnung auf dieselbe untersucht werden (der Leitungs- und Strahlungsverlust an den Rohrenden werde vernachlässigt).

Die zur Verfolgung des Wärmedurchgangs oben aufgestellten Gleichungen lauten hier:

$$\text{a)}\ \vartheta_F = 400\, e^{-\frac{F \cdot 19.5}{4000 \cdot 0{,}25}}; \qquad \text{b)}\ \vartheta_F' = 400\, e^{-\frac{F \cdot 17.6}{4000 \cdot 0{,}25}}.$$

In der nachstehenden Zahlentafel 17 sind erst von 5 zu 5 qm fortschreitend, dann von 10 zu 10 qm sämtliche in Betracht kommenden Größen zusammengestellt: die Heizgastemperaturen am Ende jedes Heizflächenabschnittes, die in dem Flächenabschnitt stündlich übertragene Wärmemenge (Dampfleistung), sowie die Wärmemengen, die von Beginn der Heizfläche bis zum Ende des betreffenden Flächenabschnittes übertragen wurden; außerdem wurden noch die mittleren Temperaturunterschiede ϑ_m und ϑ_m' (von Anfang der Heizfläche an), sowie der prozentuelle Unterschied derselben aufgenommen; Spalte 10 zeigt deutlich, wie unter dem Einfluß des Steinbelags aus ähnlichen Gründen wie

[1]) W. Siemens, Leuchten der Flamme, Sitzungsber. der Kgl. Pr. Ak. d. Wissensch. Berlin 1882, 9. Nov.

[2]) R. v. Helmholtz, Licht- und Wärmestrahlung verbrennender Gase, Verh. zur Bef. des Gewerbfleißes 1889.

[3]) W. H. Julius, Licht- und Wärmestrahlung verbrannter Gase, Verh. zur Bef. des Gewerbfleißes 1889.

bei den oben in Zahlentafel 16 dargestellten Beispielen der mittlere Temperaturunterschied höher bleibt als bei den reinen Rohren, und zwar ist dieser Unterschied ebenfalls um so beträchtlicher, je größer die Heizfläche ist; die Berechnung wurde bis zu einer Heizfläche von 50 qm durchgeführt, bei der die Heizgase den reinen Kessel mit einer Abgangstemperatur von 253°, also normalen Temperaturen verlassen. Unter diesen Verhältnissen wird, wie aus Spalte 11, die den Einfluß der Heizflächen-Größe zeigt, hervorgeht, der Verlust ε in diesem Kesselteil nur mehr 5 vH betragen, also ungefähr 50 vH von ζ.

Zahlentafel 17.

Wärmeübergang Heizgas — Wasser durch Berührung.

($t_a = 500$, $t_w = 100$ (const)).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
bestrichener Heizflächenabschnitt in qm (fortlaufend nummeriert)	Heizgastemperaturen am Ende des betrachteten Abschnittes		innerhalb des Abschnittes stündlich übertragene Wärme (Heizflächenbeanspruchung)		von Beginn der Heizfläche bis zum Ende des Abschnittes übertragene Gesamtwärme		mittlerer Temperaturunterschied (von Beginn der Gesamtheizfläche an)		Erhöhung des mittl. Temperaturunterschiedes durch den Belag $\frac{\vartheta'_m - \vartheta_m}{\vartheta_m} \cdot 100$	Verminderung der Wärmeausnutzung
	reine Heizfläche	belegte Heizfläche	reine Heizfläche	belegte Heizfläche	reine Heizfläche	belegte Heizfläche	reine Heizfläche	belegte Heizfläche		
F	t_e	t'_e	W_F	W'_F	$W_{(F-F_0)}$	$W'_{(F-F_0)}$	ϑ_m	ϑ'_m		ε
qm	°C	°C	WE/st	WE/st	WE/st	WE/st	°C	°C	vH	vH
1 bis 5	463,5	466,3	36 500	33 700	36 500	33 700	374,4	383,0	2,3	7,7
6 » 10	430,3	435,5	33 200	30 800	69 700	64 500	357,5	366,5	2,5	7,4
11 » 15	400,2	407,2	30 100	28 300	99 800	92 800	341,2	351,5	3,0	7,0
16 » 20	372,8	381,3	27 400	25 900	127 200	118 700	326,2	337,2	3,4	6,7
21 » 30	325,3	335,9	47 500	45 400	174 700	164 100	298,6	310,8	4,4	6,1
31 » 40	286,0	297,8	39 300	38 100	214 000	202 200	274,4	287,2	4,7	5,5
41 » 50	253,6	265,9	32 400	31 900	246 400	234 100	252,7	266,0	5,0	5,0

Einfluß der veränderlichen spezifischen Wärme.

Die spezifische Wärme der Heizgase ist jedoch nicht, wie angenommen, eine Konstante, sondern in verhältnismäßig weiten Grenzen mit der Zusammensetzung der Heizgase und außerdem, für jeden Bestandteil der Heizgase, mit der Temperatur veränderlich. Für eine bestimmte Zusammensetzung der Gase läßt sich dieselbe mit Hülfe der für die Bestandteile erforschten Gesetzmäßigkeiten als Funktion der Temperatur ausdrücken, so daß $c_p = \psi(t)$ wird; die zur Berechnung des Temperaturunterschiedes an der Stelle F dienende Gleichung lautet demnach unter Berücksichtigung der veränderlichen spezifischen Wärme:

$$\ln \frac{\vartheta_e}{\vartheta_a} = -\frac{F K}{G \psi(t)}.$$

Die Form der Gleichung läßt eine einfache analytische Lösung nicht zu und würde, namentlich in den später anzustellenden Berechnungen, bei denen eine weitere Variable hinzutritt, bedeutende rechnerische Schwierigkeiten mit sich bringen. Es erscheint wünschenswert, auch ferner die rechnerische Verfolgung des Wärmedurchgangs unter Annahme konstanter spezifischer Wärme durchführen zu können; zu dem Ende ist zunächst an Hand der oben abgeleiteten Beziehung der Einfluß der Veränderlichkeit von c_p auf die Berechnung festzustellen und die Fehlergröße der Rechnung mit konstantem c_p in der Folge entsprechend zu berücksichtigen.

Die absolute Größe der spezifischen Wärme von Verbrennungsgasgemischen ist wesentlich vom Gehalt an Wasserdampf abhängig, dessen spezifische Wärme bedeutend größer ist, als die der andern Bestandteile; um die gesuchte Fehlergröße für die Grenzen der praktisch auftretenden Verhältnisse zu bestimmen, werden 2 extreme Fälle in der Zusammensetzung der Heizgase zu Grunde gelegt; dieselben seien für den einen Fall durch Verbrennung einer sehr feuchten Braunkohle und im zweiten Falle durch die einer wasserarmen Steinkohle, beide Male bei gleichem Luftüberschuß, entstanden. Die Zusammensetzung der Kohle sei in Gewichtsprozenten:

Zahlentafel 18.

Bestandteil	Braunkohle vH	Schwarzkohle vH
C	34,10	80,0
H	2,80	4,50
O	10,50	5,00
S	2,41	0,50
N	0,82	1,00
Rückstände	8,57	7,00
hygrosk. Wasser	**40,80**	**2,00**

Die durch Verbrennung dieser Kohlen bei 1,75-fachem Luftüberschuß entstehenden Heizgase haben folgende Zusammensetzung:

Zahlentafel 19.[1])

Bestandteil	Braunkohle vH	Schwarzkohle vH
CO_2	11,4	12,0
O_2	9,0	9,5
H_2O	6,0	1,2
N	73,6	77,3

Es sind nun zunächst die spezifischen Wärmen der beiden Gasgemische für die Temperaturen 250 bis 500° ausgewertet, unter Benutzung der von Fuchs[2]) nach den Versuchen von Mallard und Lechatelier (von Schreber korrigiert), Lungen, sowie von Knoblauch und Jakob berechneten Tabellen für die mittlere spezifische Wärme der Bestandteile. Die in nachstehender Zahlentafel 20 zusammengestellten Werte c_m stellen die mittleren spezifischen Wärmen zwischen 0° und t^0 dar:

Zahlentafel 20.

Heizgastemperatur t °C	mittlere spezifische Wärme der Heizgase zwischen 0° und t^0: c_m	
	Braunkohle	Schwarzkohle
250	0,2605	0,2499
300	0,2637	0,2523
350	0,2656	0,2546
400	0,2680	0,2569
450	0,2704	0,2589
500	0,2723	0,2606

[1]) Zahlentafel 18 und 19 aus »Fuchs, Nutzeffekte bei verschiedenen Kohlensorten«. Mitt. für Dampfk. u. Masch.-Betrieb 1903 S. 380.

[2]) Fuchs, Formeln und Tabellen der Wärmetechnik 1907. J. Springer, Berlin.

Die mittlere spezifische Wärme c_p' zwischen t_1 und t_2 findet sich aus der Beziehung:

$$t_1 c_{m1} - t_2 c_{m2} = (t_1 - t_2) c_p'.$$

Zur Berechnung der Endtemperatur t_e der mit 500° an die Heizfläche herangebrachten Gase nach Bestreichen der 50 qm dienen die Beziehungen:

$$\text{a)} \quad t_e - 100 = (t_a - 100)\, e^{-\frac{50\,K}{G c_p'}}.$$

c_p' ist dabei die mittlere spezifische Wärme zwischen 500° und der gesuchten Endtemperatur, für welche noch die zweite Gleichung erfüllt sein muß:

$$\text{b)} \quad c_{m\,500} \cdot 500 - c_{m\,t_e} \cdot t_e = c_p' (500 - t_e).$$

(Die Temperatur t_e wurde für den jeweiligen Fall durch probeweises Einsetzen zusammengehöriger Werte von c_m und c_p' in beide Gleichungen unter Benutzung der Zahlentafel 20 und deren Interpolationswerten gefunden; bei der Berechnung wurde stets der gleiche Wärmeinhalt am Beginn der Heizfläche zu Grunde gelegt.) Die Ergebnisse sind in Zahlentafel 21 enthalten.

Zahlentafel 21.

Einfluß der Veränderlichkeit von c_p auf die Berechnung von E (500°—260°).

	1	2	3	4	5	6
	c_p variabel				c_p konstant	
	Steinkohle		Braunkohle			
	reine Heizfläche $K = 19{,}5$	Steinbelag III $K''' = 17{,}6$	reine Heizfläche $K = 19{,}5$	Steinbelag III $K''' = 17{,}6$	reine Heizfläche $K = 19{,}5$	Steinbelag III $K''' = 17{,}6$
Wärmeinhalt der Gase am Beginn der Heizfläche WE	← 544 600 →					
Endtemperatur t_e . . . °C	269,5	284,5	269,5	287,0	263,4	278,3
übertragene Wärme . . WE/st	261 400	244 700	262 800	243 700	257 700	241 500
Wärmeausnutzungsverlust ε vH	—	**6,4**	—	**7,2**	—	**6,3**

Die mit 500° und 544600 WE an die Heizfläche herangekommenen Gase verlassen die belegte Fläche bei der Braunkohle ($c' = 0{,}285$) mit 287,0°, bei der Steinkohle ($c' = 0{,}271$) mit 284,5°, während sich bei der Berechnung mit konstantem c_p eine Abgangstemperatur von 278,0° ergibt. Aus den in der letzten Reihe enthaltenen Werten ε für die Verluste an Wärmeausnutzung ist zu ersehen, daß für Heizgase mit niederer spezifischer Wärme der Fehler, der durch Annahme eines konstanten Wertes c_p entsteht, vernachlässigt werden kann (in dem betrachteten Temperaturgebiet), für Heizgase mit hohem Wassergehalt ist zu dem bei der Berechnung mit konstantem c_p gefundenen Verlustwerte für eine Temperaturabnahme von 500° auf 250° ungefähr 1 vH, bei größeren Temperaturgebieten bis zu 2 vH (absolut) zu addieren. Den folgenden Berechnungen kann in anbetracht des zu erzielenden Genauigkeitsgrades unter Berücksichtigung dieser Zuschläge weiter eine konstante spezifische Wärme zugrunde gelegt werden.

Aus den Zahlentafeln 17 und 21 geht hervor, daß die durch Steinbeläge bei Wärmeübertragung von Heizgasen an siedendes Wasser durch Konvektion und Leitung zu erwartenden Verluste ε im ungünstigsten Falle, normale Abgangstemperaturen bei reiner Heizfläche vorausgesetzt, 7 vH nicht überschreiten, und für mittelstarke Beläge nur 3 bis 5 vH der Wärmeausnutzung bei reinem Kessel betragen. Die Verlustwerte steigen etwas mit der spezifischen Wärme der Heizgase.

Wärmeübertragung durch Berührung und Strahlung.

Im Anschluß an den bisher beleuchteten Fall der reinen Berührungsübertragung, wie er für Heizrohre und die von der Feuerung entfernteren Kesselzüge sich hinreichend genau mit den wirklichen Verhältnissen deckt, sollen nun zunächst Heizflächen der Betrachtung unterzogen werden, die von seiten des Rostes, der Flammen und des erhitzten Mauerwerks bestrahlt werden, denen also in ihrer gesamten Ausdehnung Wärme gleichzeitig durch Strahlung, Konvektion und Leitung zugeführt wird (Kessel mit sehr kleinem Rostverhältnis). Die Gesetze, nach denen sich in diesem Falle die Wärmeübertraguug vollzieht, sind durch die eingangs geschilderten Versuche geklärt worden und es sollen deren Ergebnisse und die Folgerungen aus denselben, d. h. die nach den versuchsmäßig bestätigten Gesetzen aufgestellten K-Kurven (nach Gl. (III) S. 26) unmittelbar den nachfolgenden Berechnungen zugrunde gelegt werden.

Für den beabsichtigten Zweck der Vergleichsrechnungen genügt die aufgestellte Gl. (III) vollständig; die Größenordnung der später berechneten Wärmeausnutzungsverluste ε wird durch eine Abänderung der Koeffizienten überhaupt nicht verändert, wohl aber Heizflächenleistung und Endtemperaturen. Vom Verfasser wurden seinerzeit (S. 27) die Koeffizienten so gewählt, daß in allen später betrachteten Beispielen die letztgenannten Größen normale sind.

Für die Verminderung ζ der Wärmedurchgangszahlen wurde oben für mittlere Verhältnisse bis zu 11 vH, für besonders schlecht leitende starke Steine 20 bis 30 vH gefunden. Bei der Ermittlung der Abnahme ε, welche die Wärmeausnutzung in einer direkt bestrahlten Heizvorrichtung erfährt, ist zu berücksichtigen, daß nicht nur die Temperatur des Wärmeträgers, sondern auch die Absolutwerte der Durchgangszahlen sich längs der Heizfläche ändern, daß also zur Berechnung der übertragenen Wärme die Seite 35 beschriebene Lösung in ihrer allgemeinen Form verwendet werden muß. Die Gesetzmäßigkeit nach der sich K mit der Temperatur und damit über die Heizfläche ändert, und die nach der in Gl. (III) S. 26 gegebenen genauen Form für die Berechnung des Wärmedurchgangs sehr unbequem ist, ist aus den Zahlentafeln 6 bis 10 und aus den in den Fig. 5, 8 und 11 dargestellten Kurven ersichtlich; dieselbe kann im vorliegenden Fall sehr genau durch die Gleichung einer allgemeinen Parabel ausgedrückt werden von der Form:

$$\text{a)}\quad K = a + b\,\vartheta + c\,\vartheta^2.$$

Das Gesetz der Temperaturänderung längs der Heizfläche wird aus den Beziehungen gefunden:

$$\text{b)}\quad dW = -G\,c\,d\,\vartheta$$

(dW = Wärme, die auf der Fläche dF übertragen wird, c = spezifische Wärme, G = Gewicht der Heizgase),

$$\text{c)}\quad dW = K_F\,\vartheta_F\,dF$$

(der Index F bezeichnet die Heizflächenstelle).

Durch Elimination von dW und Einsetzen des Wertes K aus Gl. (a) erhält man eine Differentialgleichung; deren Lösung das Gesetz des Temperaturverlaufs längs der Heizfläche darstellt:

$$\int \frac{d\,\vartheta}{(a + b\,\vartheta + c\,\vartheta^2)\,\vartheta} = -\frac{1}{G\,c}\int dF + C.$$

Die Gleichung läßt eine Integration nur für den Fall zu, daß die K-Kurve streckenweise durch Gerade ersetzt werden kann, daß also $K = a + b\,\vartheta$. Es ist dann

$$\int \frac{d\,\vartheta}{(a + b\,\vartheta)\,\vartheta} = -\frac{1}{G\,c}\int_{F_0}^{F} d\,F + C;$$

die Lösung lautet unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen (für $F = F_0$ wird $\vartheta = \vartheta_a$):

$$\text{d)} \quad \frac{b\,\vartheta_e}{a + b\,\vartheta_e} = \frac{b\,\vartheta_a}{a + b\,\vartheta_a}\, e^{-\frac{a\,(F - F_0)}{G\,c}} = m;$$

daraus folgt:

$$\vartheta_e = \frac{a\,m}{b\,(1 - m)}.$$

Gl. (d) gibt somit die Möglichkeit, für eine beliebige Stelle der Heizfläche die Endtemperatur, und damit die Größe der dort auftretenden Durchgangszahl und die Wärmeausnutzung zu berechnen.

Ist die Ersetzung durch gerade Strecken nicht angängig (bei stark gekrümmten K-Kurven), so muß zu dem Ausweg gegriffen werden, Gl. (a) und (b) durch probeweises Einsetzen von W zu befriedigen, wobei die mit ϑ_f korrespondierenden Werte von K direkt aus der graphisch gegebenen Kurve entnommen werden. Da dies Verfahren nur für kleine Heizflächenstücke, für die genügend genau $\vartheta_f = \frac{\vartheta_a + \vartheta_e}{2}$ ist, zuverlässige Werte liefert, muß die Operation für eine größere Heizfläche sehr oft wiederholt werden, was die Rechnung ziemlich langwierig gestaltet.

Beispiele:

Strahlung auf der ganzen Heizfläche wirksam.

Nach diesem Verfahren wurde für einen auf der ganzen Heizfläche strahlender Wärme ausgesetzten Dampfkessel, der jedoch mit 180° Wassertemperatur arbeitet und bei dem die Berührungsübertragung eine intensivere, der Wirklichkeit näher kommende ist, als die im Versuchsapparat herrschende, auf Grund der durch Zahlentafel 8 und 9 und Fig. 11 festgelegten K-Kurven der Wärmedurchgang berechnet und zwar für die reine Heizfläche, für den bei der zweiten Versuchsreihe untersuchten Stein von 5,5 mm Stärke und der Leitfähigkeit 2,96; ein Stein von der Leitfähigkeit 1 und der Stärke 1,9 mm würde die gleiche Wirkung hervorrufen.

Fig. 13 gibt ein Bild über die Größe der Temperaturen und Uebergangsziffern an den einzelnen Stellen der Heizfläche unter den geänderten Uebertragungsbedingungen; außerdem ist noch die auf jeden Flächenteil treffende stündliche Dampfleistung, d. h. die an der betreffenden Heizflächenstelle in 1 Stunde auf 1 qm übertragene Wärmemenge, für den reinen Kessel und für den Steinbelag 5,5 mm dargestellt; die gleichen Werte wurden für Flächenabschnitte von 5 bezw. 10 qm in Zahlentafel 22 aufgenommen, deren letzte Spalte die Verminderung ε enthält) Aus dieser ist zu ersehen, daß der Verlust durch den Steinbelag bereits nach 10 qm nur mehr 3,9 vH beträgt und am Ende der Heizfläche bis auf 1 vH sinkt. Der Grund für diesen raschen Abfall der Verlustziffern, der namentlich in den ersten Teilen der Heizfläche sehr steil verläuft, viel schneller als bei der reinen Berührungsübertragung, ist der, daß nicht nur,

wie dort, der Temperaturunterschied bei belegter Fläche ein höherer bleibt, als bei reinem Kessel an der gleichen Heizflächenstelle, also $(t_H' - t_w > t_H - t_w)$, sondern daß infolge dieser Temperaturverschiebung auch die auf die gleiche Heizflächenstelle bezogene Verminderung der Uebergangsziffern ζ' eine geringere

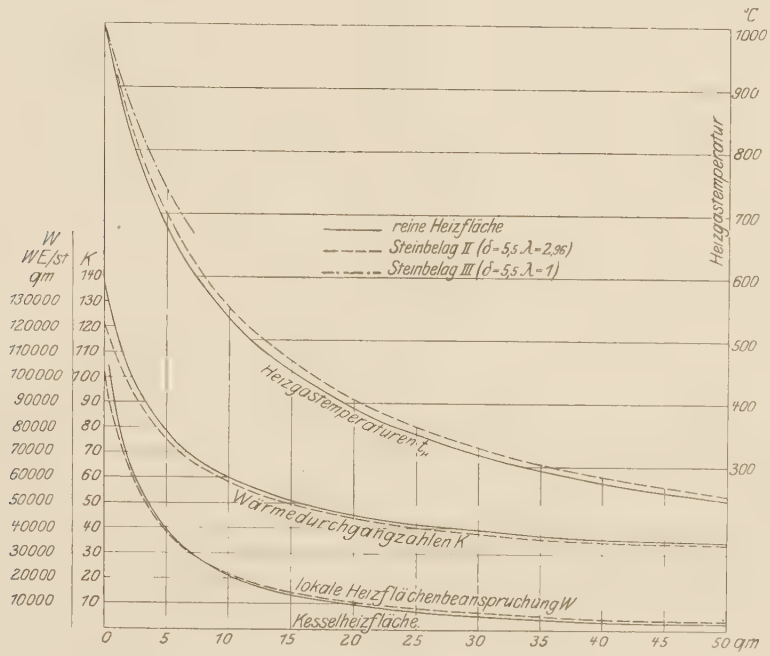

Fig. 13.

Zahlentafel 22.

Wärmedurchgang bei Strahlungs- und Berührungsübertragung längs einer Kesselheizfläche bei reiner Fläche und bei Steinbelag II [5,5 mm ($\lambda = 2{,}96$) = 1,9 mm ($\lambda = 1$)].

$t_w = 180^0$ C.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
bestrichener Heizflächenabschnitt F	Temperatur der Heizgase am Ende des Abschnittes $t_{e(F)}$		Durchgangszahl K am Ende des Flächenabschnittes		Heizflächenbeanspruchung am Ende des Flächenabschnittes		Erhöhung des Temperaturunterschiedes $\frac{\vartheta' - \vartheta}{\vartheta} \cdot 100$	Verminderung der Durchgangszahlen an der gleichen Heizflächenstelle $\varepsilon = \frac{K - K'}{K} \cdot 100$	Verlust an Wärmeausnutzung ε
	reine Heizfl.	Steinbelag II	reine Heizfl.	Steinbelag II	reine Heizfl.	Steinbelag II			
qm	^{0}C	^{0}C	WE/st/qm/^{0}C		WE/st/qm		vH	vH	vH
0,5	951	955,7	126,0	114,2	97 000	88 600	0,6	9,4	9,6
5	676,6	696,4	78,4	74,8	**38 850**	**38 800**	4,0	4,5	5,6
10	533,0	551,0	60,0	57,7	21 200	21 480	4,9	3,6	3,9
15	448,3	464,6	50,9	49,3	13 700	14 100	5,6	3,0	2,9
20	391,6	405,9	46,3	44,0	9 580	9 930	6,5	2,8	2,4
30	318,6	330,1	40,0	38,1	5 550	5 700	8,0	4,6	1,7
40	275,4	285,0	36,2	34,5	3 450	3 620	9,6	4,7	1,3
50	246,4	254,1	35,0	33,3	2 320	2 470	10,5	4,8	1,0

ist, als die auf gleiche Temperatur bezogene Verminderung ζ. (Siehe beistehende Figur: $\zeta = \frac{Z}{K}\ 100$, $\zeta' = \frac{Z'}{K}\ 100$, $Z' < Z$.) Die mit der Heizflächengröße wachsende Erhöhung des Temperaturunterschiedes ist aus Spalte 8 zu

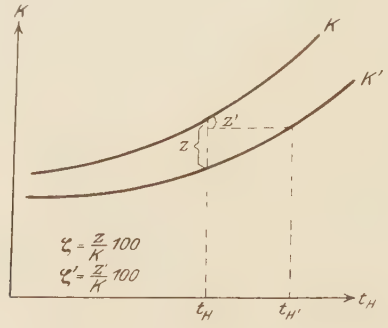

Fig. 14.

entnehmen; aus Spalte 9 ist ersichtlich, daß ζ' durchschnittlich nur 4 vH beträgt gegenüber den früher festgestellten $\zeta = 11$ vH. Die Wirkung dieser Größenverschiebung von K und ϑ zeigt sich deutlich in den Kurven für die jeweilige Dampfleistung der Heizflächenteile. Es ergibt sich z. B. für den zuletzt betrachteten Steinbelag, daß bereits nach 5 qm Heizfläche der Einfluß der Erhöhung des Temperaturunterschiedes den der Verminderung der Durchgangszahlen überwiegt; die Leistung der unreinen Heizfläche wird von hier ab größer als die der reinen. Die ganze noch zur Verfügung stehende Heizfläche trägt also dazu bei, den in den ersten 5 qm entstandenen Verlust zu vermindern und je länger diese Wirkung zur Geltung kommen kann, d. h. je größer die bestrahlte Heizfläche ist, desto kleiner wird der Endverlust. Ein auf seiner ganzen Heizfläche mit strahlender Wärmeübertragung arbeitender Kessel wird demgemäß immer im Stande sein, bei normalem Betrieb die in den ersten Teilen der Heizfläche verursachte Verminderung des Wärmeübergangs bis auf unbedeutende Beträge (2 bis 3 vH) auszugleichen, bei außerordentlich starkem schlecht leitendem Belag dürfte der Verlust (unter Berücksichtigung der variablen spezifischen Wärme) 5 vH nicht übersteigen.

Strahlungsübertragung, nur an einem Teil der Kesselheizfläche wirksam.

Der Verlauf des Wärmedurchgangs in Heizvorrichtungen bei gleichzeitiger Uebertragung durch Strahlung, Leitung und Konvektion auf der ganzen Ausdehnung der Heizfläche wurde bisher getrennt behandelt von dem reiner Berührungsübertragung auf der gesamten Heizfläche, und der Einfluß von Verunreinigungen für die beiden Fälle einzeln untersucht. In weitaus den meisten Apparaten, die in die gegenwärtig betrachtete Gruppe einzubeziehen sind, namentlich bei allen zur Dampferzeugung dienenden Kesseln, ist eine derart reinliche Scheidung der Uebertragungsverhältnisse nicht vorhanden, dieselben gehen vielmehr in den verschiedenen Teilen ein und derselben Heizfläche allmählich ineinander über; die bei allen direkten Feuerungen zu Beginn der Heizfläche überwiegende Strahlungswirkung nimmt, je nach Konstruktion und Einmauerung der Heizvorrichtung durch Verkleinerung des Verhältnisses der sich gegenseitig bestrahlenden Flächen früher oder später an Intensität in dem Maße ab,

daß sie für die Berechnung vernachlässigt werden kann, und nur mehr Berührungsübertragung die Grundlage der Rechnung zu bilden hat. Eine experimentelle Untersuchung, an welcher Stelle bei den verschiedenen Kesseltypen ein derartiger Uebergang stattfindet, ist praktisch nicht durchführbar, Bei Unterfeuerungen wird die Strahlungsübertragung sich vom Feuerungsraum aus, wo sie naturgemäß am kräftigsten auftritt, in den heißen Kesselzügen je nach der gegenseitigen Lage von Heizfläche und Mauerwerk mehr oder weniger lang fortsetzen, während sie bei Innenfeuerungen sehr bald hinter der Feuerbrücke nur mehr eine unbedeutende Steigerung des Wärmeübergangs hervorrufen kann. Für Unterfeuerungen, bei denen eine große bestrahlte Heizfläche zur Verminderung des Verlustes ε vorhanden ist, und nur noch ein geringer Teil des Verlustes durch die in dieser Hinsicht weniger wirksame Berührungsübertragung auszugleichen bleibt, wird die durch Ablagerungen verursachte Verminderung der Wärmeausnutzung ihrer Größenordnung nach sich mit den für den allgemeinen Fall der Wärmeübertragung gefundenen Werten decken, selbst in ungünstigen Fällen kann die Wärmeausnutzung bei normal beanspruchter Heizfläche um höchstens 5 vH herabgedrückt werden.

Zur Beurteilung des Höchstbetrages der Verluste, die bei einem mit Innenfeuerung versehenen Kessel sich einstellen können, werde der ungünstigste Fall angenommen: Die strahlende Wärmeübertragung finde nur in den ersten Teilen der Heizfläche bis kurz hinter der Feuerbrücke statt, und zwar werde als Grenze die Heizflächenstelle festgesetzt, an der die lokale Heizflächenbeanspruchung bei belegtem Kessel der bei reinem Kessel eben gleichkommt (siehe Fig. 13); der gesamte gegenüber der hohen Strahlungswirkung bei reinen Blechen entstandene Verlust ist in diesem Falle lediglich durch die verhältnismäßig schwach ausgleichende Berührungsübertragung zu vermindern. Der Punkt der Ueberschneidung der Dampfleistungen tritt für den besser leitenden Stein nach 5 qm, für den schlecht leitenden im 8. qm ein; der letztere Punkt werde der Rechnung für einen Flammrohrkessel zugrunde gelegt, die strahlende Wirkung mache sich nur auf etwa ein Viertel der Flammrohrheizfläche geltend, die Anfangsbedingungen seien die gleichen, wie bei den obigen Beispielen. Um die Heizgase, deren Temperatur nach 7 qm noch 600° beträgt, bei reinem Kessel bis auf 250° abzukühlen, ist bei Berührungsübertragung noch eine Heizfläche von 92 qm notwendig (wie sich aus Gl. (1) Seite 37 leicht berechnet). Die mittlere Heizflächenbeanspruchung für den nunmehr 100 qm großen Flammrohrkessel ergibt sich zu 12 kg/qm.

Zahlentafel 23.

		Steinbelag II $\lambda = 2{,}96$	Steinbelag III $\lambda = 1$
Heizgastemperatur am Ende der bestrahlten Heizfläche . .	°C	617	671
Ausnutzungsverlust am Ende der bestrahlten Heizfläche ε_1 .	vH	4,3	17,8
Heizgastemperatur am Kesselende	°C	257,5	277,3
Ausnutzungsverlust am Kesselende ε	vH	1,0	3,6

Unter der Annahme, daß die Strahlungsübertragung nur in den ersten 7 qm nach den früher festgelegten Gesetzen stattfindet, in den folgenden Teilen der Heizfläche hingegen nur mehr konvektiv leitende Uebertragung in Rechnung zu ziehen ist, wurde für die beiden Steinbeläge ($\lambda = 2{,}96$ und $\lambda = 1$) von 5,5 mm Stärke der Verlauf des Wärmedurchgangs festgestellt und in Zahlentafel 23 zum Ausdruck gebracht. Bei dem besser leitenden Belag beträgt ε_1 am Ende des

bestrahlten Teils nur mehr 4,3 vH, der im Verlauf der weiteren Heizfläche auf 1 vH vermindert wird, während bei dem schlechteren Belag, bei dem nach 7 qm noch ein Verlust von 17,8 vH vorhanden war, das höhere Temperaturgefälle an der gesamten für Berührungsübertragung in Betracht gezogenen Heizfläche eine Verminderung dieses Verlustes auf 3,6 vH bewirkte. Es kann demnach unter den für Innenfeuerungen angenommenen ungünstigsten Uebertragungsverhältnissen ein annähernd 6 mm starker, mittelgut leitender Stein (unter Berücksichtigung der veränderlichen spezifischen Wärme und des infolge der höheren Temperatur gesteigerten Strahlungsverlustes) eine Verminderung von 3 vH, ein sehr schlecht leitender eine solche bis zu 6 vH zur Folge haben, vorausgesetzt, daß der Steinbelag sich in gleichmäßiger Stärke über die ganze Heizfläche erstreckt. Die stärkste Ablagerung von Kesselstein findet erfahrungsgemäß an Stellen ruhiger Verdampfung statt, während sich an den Teilen der Heizfläche, an welchen die intensivste Wärmeübertragung eintritt, den der direkten Strahlung ausgesetzten Feuerplatten, infolge der heftigen Wasser- und Dampfblasenbewegung meist nur verhältnismäßig dünne Steinschichten ansetzen[1]); namentlich bei Innenfeuerungen, wo die gesamte strahlende Wärme, die bei der Verbrennung erzeugt wird, die ersten Teile der Kesselheizfläche trifft und hier eine besonders lebhafte Wärmeströmung hervorruft, ist für gewöhnlich der Belag der Anfangsheizfläche gering (von lokalen Ansammlungen von Splittern, Steinkuchen und dergl. vorläufig abgesehen). Damit wird der wirksamsten Verlustquelle ein großer Teil ihrer Gefährlichkeit genommen und die praktisch auftretenden Ziffern werden auch für Innenfeuerung nicht die für den ungünstigsten Fall berechneten Werte erreichen.

Allgemein läßt sich auf Grund der angestellten Betrachtungen ein Urteil dahin zusammenfassen, daß, gleiche Anfangsbedingungen vorausgesetzt, in normal beanspruchten Dampfkesseln die Verminderung der Wärmeausnutzung durch schlecht leitende Steinablagerungen von 5 bis 6 mm Stärke gegenüber dem Betrieb mit weichem Wasser für Unterfeuerungen eine Größe von 2 bis 4 vH, für Innenfeuerungen eine solche von 3 bis 6 vH erreicht (der Einfluß der veränderlichen spezifischen Wärme, sowie des infolge der höheren Temperatur etwas gesteigerten Leitungs- und Strahlungsverlustes ist hierbei bereits berücksichtigt).

Einfluß der Forcierung.

Als Grundlage des Vergleichs der Wärmeausnutzung bei reinen und bei verlegten Kesselheizflächen wurden bisher gleiche Anfangsbedingungen gewählt, so daß der prozentuelle Verlust an Wärmeausnutzung gleichzeitig die Verminderung der Dampfleistung des Kessels zum Ausdruck bringt. Im allgemeinen ist jedoch die Kenntnis des Wärmeausnutzungsverlustes oder mit anderen Worten des Brennstoffmehrverbrauchs für gleiche Kesselleistung erwünscht, um den wirklichen materiellen Schaden, der durch einen Belag entsteht, beurteilen zu können. Um trotz der geringeren Wärmeausnutzung bei unreinen Flächen die gleiche Gesamtleistung der Heizfläche zu erzielen, wie beim reinen Kessel, muß derselben eine entsprechend höhere Wärmemenge zugeführt werden, die Feuerung muß um den Verlustbetrag forciert werden. Da die der Wirklichkeit nahekommende Annahme der hierdurch gegenüber dem reinen Kessel veränderten Anfangsbedingungen für gleiche Gesamtleistung eine äußerst unsichere ist, so wird im nachstehenden für

[1]) R. Wilson, Die Dampfkessel 1878 Seite 345, ferner Schimming, Die Beurteilung der Dampfkessel 1886 Seite 45.

verschiedene Kesseltypen der Einfluß untersucht, den eine gesteigerte Beanspruchung von Rost- und Heizfläche auf die Größe der Verlustziffern ausübt, jeweils gleiche Anfangsbedingungen vorausgesetzt. Die für eine Steigerung der Heizflächenleistung um 2 bis 6 vH sich ergebenden Unterschiede von ε geben dann, als Korrekturen zu den oben gefundenen Verlustzahlen gefügt, die Wärmeausnützungsverluste bei gleicher Dampfleistung; gleichzeitig wird der Einfluß des Forcierungsgrades auf die Wirkung der Verunreinigungen klargestellt. Es werden 3 Typen von Kesselfeuerungen einer Betrachtung unterzogen: einer Innenfeuerung etwa ein Flammrohrkessel, bei dem die direkt bestrahlte Fläche nur einen geringen Teil der gesamten Heizfläche bildet, eine Außenfeuerung, bei der sich die merklich wirksame Strahlung auf ein Viertel der Heizfläche fühlbar machen möge, wie dies bei Wasserrohrkesseln zutreffen dürfte, und eine Außenfeuerung, bei welcher die Strahlungswirkung auf vier Zehntel der gesamten Fläche in Rechnung gezogen wird; letztere Annahme entspricht ungefähr den Uebertragungsverhältnissen über einen Schiffskesselrost, dessen glühende Fläche sich beinahe über die gesamte Grundfläche des zugehörigen Kessels erstreckt. Die mit Hülfe der in Fig. 11 dargestellten K-Kurven, d. h. des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes, unter Annahme gleicher Anfangsbedingungungen, für die drei Feuerungsarten gefundenen mittleren Heizflächenbeanspruchungen bei reinem Kessel und bei normalen Abgangstemperaturen (15 kg/qm für Flammrohrkessel, 16 kg/qm für Wasserrohrkessel, 24 kg/qm für Schiffskessel) ebenso wie die Steigerung der Abgangstemperaturen bei erhöhter Beanspruchung decken sich genau mit den Erfahrungen der Praxis und bilden einen Beweis für die Richtigkeit der gewählten Grundlagen.

Wirkung des Forcierens und Berücksichtigung derselben in den Anfangsbedingungen.

Um die Wärmezufuhr zu einer Kesselfläche gegenüber dem normalen Betrieb zu erhöhen, d. h. um die Feuerung zu forcieren, muß auf dem Rost in der Zeiteinheit eine größere Brennstoffmenge zur Verbrennung gebracht werden; es ist dies möglich durch Vergrößerung der Schichthöhe und, um dem vermehrten Brennstoff die nötige Luftmenge zuzuführen und den durch die höhere Schicht vergrößerten Durchgangswiderstand auszugleichen, durch eine Verstärkung der Zugwirkung. Obwohl der Wirkungsgrad der Feuerung infolge der gesteigerten Verluste durch Ruß und unverbrannte Gase gewöhnlich kleiner ist, als bei normalem Betrieb, steigt infolge der durch den lebhaften Zug und die hohe Schicht hervorrufenen Bildung heißer Stichflammen[1]) der pyrometrische Effekt, die Anfangstemperatur. In den nachfolgenden in Zahlentafel 24 zusammengestellten Beispielen für gesteigerte Kesselleistung, die unter Benutzung von Gl. (III) nach dem auf Seite 46 geschilderten Verfahren berechnet sind, sind dementsprechend die Anfangsbedingungen derart gewählt, daß sowohl für die Anfangstemperatur, als auch für das infolge der größeren Brennstoffmenge vermehrte Heizgasgewicht G höhere Werte eingesetzt werden, als bei mäßiger Beanspruchung. Die letzte Reihe der Zahlentafel zeigt die sich für die jeweilige Beanspruchung ergebende Verlustziffer ε (um den wirklichen Verlust ε' zu bekommen, ist zur Berücksichtigung des Einflusses der veränderlichen spezifischen Wärme und des gesteigerten Strahlungsverlustes ein Zuschlag von 2 bis 3 vH (absolut) zu geben).

[1]) F. Janda, Allgemeines über direkte Feuerungen, Oesterr. Zeitschrift für Berg- und Hüttenwesen 1907 S. 206 u. f.

Zahlentafel 24.

Einfluß des Forcierungsgrades auf den Wärmeausnutzungsverlust in Dampfkesseln.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Art der Feuerung	Außenfeuerung								Innenfeuerung								
	gewöhnliches Rostverhältnis				Schiffskessel												
gesamte Heizfläche qm	80				100				100						70		
bestrahlte Heizfläche qm	20				40				8						5		
Heizflächenbeanspruchung	mäßig 15 kg/qm		normal 16 kg/qm		mäßig 20 kg/qm		normal 24 kg/qm		mäßig 12 kg/qm			normal 14,5 kg/qm			forciert 19,6 kg/qm		
Zustand der Heizfläche	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	belegt $\lambda=1$ $\delta=5,5$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	belegt $\lambda=1$ $\delta=5,5$	rein	belegt $\lambda=1$ $\delta=1,9$	belegt $\lambda=1$ $\delta=5,5$
Heizgastemperatur am Beginn der Heizfläche °C	1000		1100		1000		1100		1000			1100			1200		
Wärmeinhalt der Heizgase für $1^0C = c_m \cdot G$ WE	1000		1100		1000		1100		1000			1100			1000		
Temperatur am Ende der bestrahlten Heizfläche °C	391,6	405,8	418,8	434,2	275,4	283,9	300,3	302,9	600 0	617,0	671,0	625,0	642,6	700,0	737,9	761.9	829,9
Abgastemperatur am Kesselende °C	245,7	253,1	262,6	271,2	244,6	251,3	264,4	266,9	250,0	257,5	277,3	267,1	276,0	299,4	337,1	351,5	387,1
Verlust ε . . . . . vH [c_p variabel nicht berücksichtigt]	—	0,98	—	1,05	—	0,78	—	0,30	—	1,00	3,65	—	1,07	3,88	—	1,70	6,00

Es zeigt sich, daß eine innerhalb der oben angedeuteten Grenzen erfolgende mäßige Steigerung der Heizflächenbeanspruchung nur unwesentlichen Einfluß auf die Größe von ε ausübt; während für den Schiffskessel eine kleine Verringerung von ε eintritt, steigt für den Wasserrohrkessel bei Erhöhung der Kesselleistung von 15 kg auf 16 kg ε von 0,98 auf 1,05 vH, für den Flammrohrkessel (bei einer Steigerung von 12 kg auf 14,5 kg) von 1,00 auf 1,07 vH bei einem Belag von 1,9 mm, während bei demselben Belag aber 5,5 mm Stärke ε von 3,65 auf 3,88 vH anwächst Die Größe des Gesamtverlustes ε' ändert sich also praktisch für die zur Erzielung gleicher Kesselleistung notwendig werdende Erhöhung des Forcierungsgrades nicht; es werden demnach bei normaler Kesselbeanspruchung auch für gleiche Dampfleistung die durch schlecht leitende feste Steinschichten von 2 bis 6 mm Stärke hervorgerufenen Verluste ε' auf Seite 50 angegebene Größe nicht überschreiten. Die durch besser leitende Steinbeläge von normal auftretenden Stärken entstehenden Verluste können praktisch überhaupt vernachlässigt werden.

Zahlentafel 25.

Steigerung der Dampfleistung der ersten Heizfläche.

stündlich auf 1 qm Rost verheizte Kohlen kg/st/qm	Dampfleistung der untersten Rohrreihe kg/qm/st
50	42
75	63
100	83
125	97
150	111
175	125
200	135
250	158
300	173

Bei stärkerer Forcierung der Feuerung steigt vor allem die Wärmeübertragung auf dem direkt bestrahlten Teil der Heizfläche; diese Tatsache kann aus dem steilen Ansteigen der K-Kurven (reines Blech) bei hohen Temperaturen gefolgert werden und ist durch Versuche von Gebr. Niclausse an einem aus 12 übereinanderliegenden Rohrreihen bestehenden Kessel, an dem die Dampfleistung jeder Rohrreihe für sich bestimmt wurde, erwiesen; aus den von C. Strebel[1]) mitgeteilten Ergebnissen kann die in Zahlentafel 25 enthaltene Steigerung der Dampfleistung der untersten direkt bestrahlten Vorreihe in Abhängigkeit vom Forcierungsgrad ersehen werden. Infolge dieser stark vermehrten Wärmeübertragung an der bestrahlten Heizfläche, sowie infolge des gegenüber der reinen Heizfläche weniger steilen Ansteigens der K-Kurven bei höheren Heizgastemperaturen (was durch die hohen Blechtemperaturen verursacht wird), wird der auf der direkten Heizfläche entstehende Verlust bedeutend höher werden und durch die anschließende Berührungsübertragung nicht soweit herabgemindert werden können, wie bei gemäßigtem Betrieb der Feuerung. Es wird dies durch das in Zahlentafel 24 enthaltene Beispiel bestätigt, in dem die Kesselleistung auf 19,6 kg/qm (gegenüber 12 kg mäßig) gesteigert angenommen wurde. Der Verlust ε ergibt sich bei 1,9 mm Belag zu

[1]) Die Wasserrohrkessel im Kriegschiffbetrieb, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1908 S. 8 u. f.

1,70 vH (gegenüber 1,00 vH) und bei 5,5 mm Belag zu 6,0 vH (gegenüber 3,65 vH) also eine Steigerung von ε um rd. 70 vH.

Für stark beanspruchte Kessel kann demnach der durch schlecht leitende feste Steinablagerungen verursachte Brennstoffmehrverbrauch zur Erzielung gleicher Dampfmengen bereits bei 2 mm Stein den Betrag von 4 vH, bei 5,5 mm Stein einen solchen von etwa 8 vH erreichen, vorausgesetzt, daß sich ein derartiger Belag in voller Stärke auch auf die ersten Heizflächenteile erstreckt. (Ein 5,5 mm starker Belag ($\lambda = 1$) würde indes bei Röhrenkesseln infolge der durch die erhöhten Blechtemperaturen bewirkten starken Rohrdehnungen bedeutende Undichtheiten hervorrufen und wird, wenigstens bei dieser Kesseltype, praktisch in dieser Stärke nie zugelassen werden.)

Lokomotivbetrieb.

Besondere Beachtung verdient an dieser Stelle eine Gattung Dampfkessel, deren Dampfleistung im Vergleich zu ihrer Heizflächengröße, deren Ausdehnung aus konstruktiven und betriebstechnischen Gründen starke Beschränkungen auferlegt sind, eine außergewöhnlich beträchtliche ist, die also ständig stark forciert betrieben werden müssen: die Lokomotivkessel; namentlich haben die Kessel der Personen- und Schnellzugslokomotiven, die außer zu Heizzwecken Dampf für den Betrieb einer 1000- bis 1500pferdigen Maschine zu liefern haben, 45 bis 56 kg Dampf pro Std. und qm Heizfläche zu erzeugen. Um dies zu ermöglichen, muß die Rostbeanspruchung mit Hülfe künstlichen Zuges (bis zu 75 mm Wassersäule über dem Rost) stark erhöht werden, die starke Saugwirkung, sowie die große Schichthöhe erzeugen sehr hohe Anfangstemperaturen; nach von R. Strahl[1]) mitgeteilten, mit Hülfe von Wanner-Pyrometern angestellten Beobachtungen an $^2/_4$-Verbund-Schnellzugslokomotiven betrugen die Temperaturen in der Feuerbüchse bis zu 1640° C, im Mittel 1500°. Bei diesen Kesseln wird infolge der starken Forcierung die Einwirkung eines Steinbelages sich weit fühlbarer machen, als bei stabilen Kesseln, zumal gerade die bestrahlte Heizfläche, die Feuerbüchsdecke und Wände mit den zahlreichen Bolzen und Ankern, besonders das Festbrennen von Verunreinigungen begünstigt. Bei der Durchrechnung eines Beispieles werden die Heizflächenverhältnisse, die bei einer $^2/_4$-Verbund-Maschine vorhanden sind, angenommen und 1500° Anfangstemperatur; die Brennstoffmenge (und damit der Wärmeinhalt der Heizgase) wird derart gewählt, daß sich für normale Endtemperaturen die gewöhnliche Heizflächenbeanspruchung von ungefähr 50 kg/qm/st ergibt. Für die Berührungsübertragung in den engen Heizrohren wird mit Rücksicht auf die große Gasgeschwindigkeit und den kleinen Rohrdurchmesser für die Durchgangszahl α_l der außergewöhnlich hohe Wert 40 gesetzt (in Analogie zu der früher besprochenen Steigerung der Durchgangszahlen von Dampf an Metall in engen Heizrohren), eine Annahme, die durch später zu besprechende Versuchsergebnisse an Heizrohren bestätigt wird. Unter diesen Bedingungen findet sich unter Anwendung unserer Gl. (III) für den reinen Kessel die Beanspruchung zu 49 kg/qm, die Endtemperatur zu 381°, und der Anteil der direkten Heizfläche an der gesamten Uebertragung zu 47 vH (es deckt sich dies Ergebnis genau mit dem von Strahl auf Grund von Beobachtungen an derselben Maschine und von Berechnungen, die auf einer von der des Verfassers ganz abweichenden Grundlage angestellt sind, gefundenen Resultaten)[2]). Der Verlust ε, den ein nicht

[1]) Wert der Heizflächen in Lokomotiven, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1905 S. 717 u. f.

[2]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1905 S. 719 u. f.

Zahlentafel 26.
Wärmeausnutzungsverlust in einer $^2/_4$-Verbundlokomotive.

direkte Heizfläche H_d . . .	9,0 qm	
indirekte Heizfläche H_i . .	109,0 »	
gesamte Heizfläche	118,0 »	
Rostfläche	2,27 »	
Anfangstemperatur	1500° C	
Wärmeinhalt für 1°C ($c_m \cdot G$)	3200 WE	
Zustand der Heizfläche . .	rein	Steinbelag $\lambda = 1$ mm $\delta = 1{,}9$ »
Temperatur am Ende von H_d	976,2	1013,1°C
Temperatur am Ende von H_i	381	411,1°C
Wärmeausnutzungsverlust ε (c_p variabel nicht berücksichtigt)	—	2,7 vH

ganz 2 mm dicker Steinbelag hervorbringt (siehe Zahlentafel 26), beträgt hier bereits 2,7 vH (gegenüber einem solchen 1 vH bei stabilen Kesseln, also eine Steigerung von ε um 170 vH). Da die in Lokomotiven verfeuerten Kohlen, namentlich bei Kleinkohlenfeuer, meist stark angefeuchtet werden, muß in Anbetracht des hohen Wasserdampfgehaltes der Heizgase und des großen Temperaturgebietes für den Einfluß der Veränderlichkeit von c_p, sowie für die Steigerung des Strahlungsverlustes zu ε ein Zuschlag von rd. 3 vH gemacht werden. Dementsprechend bringt ein nur 2 mm starker Belag in einer Lokomotive des besprochenen Types einen Wärmeausnutzungsverlust von annähernd 6 vH hervor; um trotz dieser Verminderung die gleiche Gesamtleistung zu erzielen, müßten statt wie angenommen, stündlich 350 kg Kohlen pro qm Rost deren 370 kg verbrannt werden. Die hierfür nötige Steigerung der Saugwirkung hätte eine Vermehrung des Verlegens der engen Heizrohre durch Ruß und mitgerissene Kohlenteilchen[1]) und damit indirekt eine weitere Vermehrung des Ausnützungsverlustes zur Folge.

Schlecht leitende Steinbeläge von 2 bis 3 mm Stärke können demzufolge in voll betriebenen Lokomotivkesseln Verluste von 5 bis 9 vH der Wärmeausnutzung hervorrufen.

Zusammenfassung.

Die schädliche Wirkung, welche fest anhaftende Kesselsteinschichten in bezug auf Wärmeausnützung in Dampfkesseln und anderen gasgeheizten Vorrichtungen ausüben, unterschreitet wesentlich die Größenordnung der Verluste in Heizvorrichtungen, bei denen Sattdampf oder Flüssigkeiten als Wärmeträger auftreten. Sehr dünne Schichten haben in normal beanspruchten Kesseln überhaupt keinen merklichen Einfluß und können unbedenklich zugelassen werden, zumal sie erfahrungsgemäß[2]) einen Schutz gegen Korrosionen und gegen die Erzeugung nassen Dampfes bilden. In Dampfkesseln und überhaupt in Heizapparaten, in denen die Härtebildner sich nicht in festen, die

[1]) Bruck, Praxis der Lokomotivheizung, Wien 1902.

[2]) Wiener Zeitschrift des Dampfkessel-Ueberwachungs- und Versicherungs-Vereines 1897 S. 126, ferner Wilson, a. a. O. S. 183.

Heizflächen gleichmäßig überziehenden Krusten, sondern in Form von Schlamm (Karbonate), der an sich bedeutend kleineres Leitvermögen besitzt, ausscheiden, werden im Dauerbetrieb die Gesamtverluste doch nicht die für feste Schichten berechnete Größe annehmen, da stets nur ein verhältnismäßig kleiner Teil der Heizfläche von Schlamm bedeckt sein wird; wohl aber kann in der Anheizperiode durch die nicht wie beim Sieden teilweise in Wasser suspendierten, sondern ruhig auf der Heizfläche lagernden Schlammhaufen, die das Loslösen der Dampfblasen verhindern und die Einleitung der Wasserbewegung verzögern, eine bedeutende Steigerung des Uebergangswiderstandes $\frac{1}{\alpha_w}$ hervorgerufen werden, was eine entsprechende Verlängerung der Anheizperiode zur Folge hat, Namentlich bei Heizvorrichtungen mit häufiger Betriebsunterbrechung kann sich die Wirkung stärkerer Schlammablagerungen im Wärmeverbrauch sehr fühlbar machen.

Literatur.

Die Ergebnisse vergleichender Verdampfungsversuche, die zum Nachweis des schädlichen Einflusses von Steinablagerungen an Dampfkesseln ausgeführt wurden, können zur Bestätigung der vorstehenden Berechnungen nur mit einer gewissen Vorsicht herangezogen werden; zunächst ist der Genauigkeitsgrad derartiger Versuche von einer Größenordnung, die häufig derjenigen des gesuchten Einflusses gleichkommt, und ferner müßten sich die Feuerseiten der Kessel bei den Vergleichsversuchen in gleichem Zustand befinden, was praktisch sich nur angenähert erreichen läßt. Der Einfluß der Berußung kann an den Heizflächen, an denen eine merkliche Strahlungsübertragung stattfindet, sich in einer bedeutenden Steigerung des Wärmeübergangs äußern[1]), während Rußbeläge in den letzten Feuerzügen ebenso wie Flugaschenansammlungen, deren Leitfähigkeit von Ernst zu nur 0,03 bezw. 0,065 festgestellt wurde, weitaus größere Verluste hervorrufen können, als die Verunreinigungen der Wasserseite.

Eine Reihe vergleichender Verdampfungsversuche, die im Jahre 1882 in der Münchener Heizversuchstation[2]) mit großer Sorgfalt an einem Lokomobilkessel durchgeführt wurden (poröser Gipsbelag (λ etwa 3), Feuerdecke bis 8 mm, Heizröhren 3 bis 12 mm, Rauchkammer 1 bis 5 mm) ließen keinerlei schädlichen Einfluß des Belages erkennen.

In der Ingenieur-Versuchsanstalt der Universität Illinois[3]) wurden im Jahre 1898 Vergleichsversuche mit einer Güterzugslokomotive durchgeführt. Die Versuche mit einem an den Heizrohren 0,8 mm, an der direkten Heizfläche 1,2 mm starken Steinbelag fanden nach 21monatlichem Betrieb der Maschine statt, kurz bevor dieselbe zur Reinigung und Rohrauswechslung in die Reparaturwerkstätte einlief, mit einer Heizflächenbeanspruchung von 29 kg/qm. Die Versuche mit dem gereinigten und mit neuen Rohren versehenen Kessel fanden nach 2 bis 3 regulären Fahrten statt und lieferten bei 33 kg/qm Heizflächenbeanspruchung eine um im Mittel 9,55 vH bessere Wärmeausnutzung. Dieser Verlust ist jedoch nicht ausschließlich der Wirkung des Steinbelages, sondern zum Teil auch der infolge der längeren Betriebszeit stärkeren Verunreinigung der Feuerseite zuzuschreiben.

[1]) Eberle, Protokoll des internationalen Verbandes der Dampfkessel-Ueberwachungs-Vereins 1906 S. 150.

[2]) Zeitschr. d. Bayerischen Revisions-Vereines 1898 S. 39.

[3]) Bulletin Nr. 11, 1. April 1907, Vol. IV Nr. 15, University of Illinois Engineering experiment Station Urbana, Illinois.

Die angeführten Versuche, bei denen der Einfluß der Nebeneinwirkungen nach Möglichkeit ausgeschaltet wurde, bestätigen vollständig das oben ausgesprochene Urteil über die Größenordnung der Verluste; sie widerlegen, ebenso wie Versuche von W. Kent[1]), die ebenfalls eine merkbare Steigerung des Brennstoffverbrauchs bei einem Belag von 0,6 mm nicht erkennen ließen, die ursprünglich von John Graham[2]) ausgesprochene und von J. G. Rodgers[3]) bestätigte und in der Folge namentlich durch Wilson weit verbreitete Ansicht, daß bereits eine 1,5 mm starke Schicht Verluste von 15 bis 16 vH im Dampfkesselbetrieb hervorrufen könne, die durch stärkere Beläge bis zu 50 vH und mehr gesteigert werden, Verlustgrößen, die wohl für die Verminderung der Durchgangszahlen, nicht aber für die der Wärmeausnutzung Geltung besitzen.

C. Stromeyer und W. Barus[4]) legen in einem Beispiel der Berechnung des Wärmedurchgangs die Annahme einer linear mit dem Temperaturunterschied wachsenden Wärmeübertragung zugrunde (also Berührungsübertragung auf der ganzen Heizfläche), und gelangen damit zu 2,5 vH Ausnutzungsverlust bei 3 mm Stein und normaler Dampfleistung, und zu 11 vH Verlust beim gleichen Stein und forcierter Heizfläche.

Laboratoriumsversuche, die von der National Association of Stationary Engineers[5]) mit einem reinen und dann mit Gips überzogenen Heizrohre, das in ein Verdampfergefäß eingesetzt und von den Heizgasen durchstrichen wurde (Berührungsübertragung), ergaben mit dem Belag keine Verlängerung der Zeit, die zur Erhitzung einer bestimmten Wassermenge auf die gleiche Temperatur erforderlich war. (Die Verminderung des Brennstoffverbrauchs von Eisenbahngesellschaften durch die Verwendung gereinigten Wassers, die außer den Verlusten im Lokomotiv-Dauerbetrieb auch die Anheizverluste und die Verluste bei der Warmwasserbereitung berücksichtigen, werden, ebenso wie die Brennstoffersparnis bei stationären Anlagen, an späterer Stelle besprochen.)

4. Fall: t_1 variabel, t_2 variabel.

In den meisten Heizvorrichtungen, die nicht zum Verdampfen, sondern lediglich zum Erwärmen von Wasser und wäßrigen Lösungen dienen, ändern Wärmegeber und Wärmenehmer ihre Temperatur längs der Heizfläche, die sie in Gleich- oder Gegenstrom bestreichen (Warmwasserapparate, Vorwärmer, Ekonomiser, Rieselkondensatoren usw.); mit ganz verschwindenden Ausnahmen (z. B. die direkte Heizfläche der Warmwasserniederdruckkessel, für welche die unter Fall 3 gefundenen Verlustgrößen gelten) genügt für die Berechnung des Wärmeübergangs in diesen Vorrichtungen die Annahme einer Uebertragung durch Berührung und Konvektion allein, so daß die Verwendung konstanter Durchgangszahlen K und K' gerechtfertigt ist. Der mittlere Temperaturunterschied ϑ_m findet sich aus der Gleichung:

$$\text{a)}\quad \vartheta_m = \frac{\vartheta_a - \vartheta_e}{\ln \frac{\vartheta_a}{\vartheta_e}},$$

[1]) W. Kent, Steam Boiler Economy S. 318.
[2]) Memoirs of the Literary and Philos. Society of Manchester 1860.
[3]) Proceedings of the American Railway Master Mechanics Association of 1872.
[4]) Proceedings of the Inst. of Mech. Eng. London 1903.
[5]) Power, May 1896.

der Temperaturunterschied am Ende der Heizfläche aus der Beziehung[1]):

$$\text{b)}\quad \vartheta_e = \vartheta_a\, e^{-FK\left(\frac{1}{G_1 c_1} \pm \frac{1}{G_2 c_2}\right)},$$

(das +-Zeichen bezieht sich auf Gleich-, das —-Zeichen auf Gegenstrom). Die Berechnung, sowie die Größenordnung der Wärmedurchgangsverluste ist also im wesentlichen die gleiche, wie die der unter Fall 2 beleuchteten Heizvorrichtungen. Die Verlustgröße der Wärmeausnutzung ist nicht nur von der Absolutgröße der Durchgangszahlen, sondern auch hauptsächlich von der Heizflächengröße abhängig; die Verluste werden im allgemeinen wegen der schnelleren Abnahme des Temperaturunterschiedes mit wachsender Heizfläche nicht ganz soweit verringert werden, als wenn nur ein Körper die Temperatur ändert.

Nach früherem würden für Sattdampf geheizte Vorrichtungen Verluste von 20 bis 35 vH, für Heißdampf- und Heizgas-geheizte 5 bis 15 vH unter normalen Umständen zu erwarten sein: für sehr enge Heizrohre, sowie für den Fall des Wärmeübergangs zwischen bewegten Flüssigkeiten (K rd. 700) Verlustbeträge bis zu 50 vH der Wärmeausnutzung in reinem Zustand.

Beispiel.

Es sei hier der Einfluß untersucht, den ein 5,5 mm starker Belag in einem Ekonomiser hervorbringt, deren Betrieb bekanntlich durch die starke Ablagerung von Härtebildnern häufig gestört wird. Die durch zahlreiche Versuche an Ekonomisern festgestellten Durchgangszahlen K schwanken zwischen 8 und 15. Wird für einen Ekonomiser von 144 qm Heizfläche der Mittelwert $K = 12$ eingesetzt, so werden, wie mittels Formel a) leicht bestimmbar, bei einer Temperatur der Heizgase von 300° beim Eintritt und 150° beim Austritt aus dem Ekonomiser 3237 kg im Gegenstrom fließenden Wassers von 10° auf 100° erwärmt werden können. Für die angenommene Belagstärke und die Leitfähigkeit 1 ergibt sich K' zu 10,3, die Verminderung der Durchgangszahlen ζ demnach zu 14,2 vH. Bei der angegebenen Abkühlung der Heizgase und der mittleren spezifischen Wärme von 0,25 zwischen 150 und 300° ergibt sich ein zugeströmtes Heizgasgewicht von stündlich 7770 kg. Tritt die gleiche Heizgas- und Wassermenge (Eintrittstemperaturen 300° bezw. 10°) in den Ekonomiser, wie bei reinem Zustande, so findet sich mit $K' = 10{,}3$ die Endtemperatur der Abgase zu 162,9°, die des Wassers zu 92,2°, der Wärmeausnutzungsverlust beträgt 8,7 vH.

Versuche mit Heizröhren.

An dieser Stelle sind die ausgedehnten Versuchsreihen zu erwähnen, die in den Jahren 1901 bis 1905 von dem Railway Engineering department of the University of Illinois[2]) mit einzelnen kesselsteinbedeckten Lokomotivheizrohren angestellt wurden; dieselben wurden als Heizfläche in eine zylindrische Wasserkammer eingefügt, von Heizgasen, die in einer Verlängerung der Wasserkammer zur Verbrennung gebracht wurden, durchströmt und vom Wasser im Gegenstrom umspült. Aus der Erwärmung der durchgeflossenen Wassermenge wurde unter Umrechnung auf den gleichen Temperaturunterschied der Wärmedurchgang bei reinen und bei verunreinigten Rohren und damit der Wärmeausnutzungsverlust bestimmt; leider wurde bei den Versuchen übersehen, daß außer dem Heizrohr noch eine nicht von Stein bedeckte Fläche an der Wärmeübertragung mitwirkte: die Trennungswand von Verbrennungs- und Wasserkammer,

[1]) Lorenz, Technische Wärmelehre 1904 S. 450.

[2]) Bulletin Nr. 11 a. a. O. Aus den Versuchen mit reinen Rohren berechnet sich K zu 40.

so daß die gefundenen Wärmeausnutzungsverluste, die, ganz unabhängig von der 0,5 bis 2,2 mm betragenden Steindicke, zwischen 1,2 vH und 15 vH schwanken, und bei der letzten besonders sorgfältig durchgeführten Versuchsreihe 9.8 vH nicht überschreiten, sämtlich etwas zu klein bestimmt sind, immerhin aber das oben ausgesprochene Urteil über die Verlustgrenzen bestätigen.

Da sämtliche Steinablagerungen chemisch analysiert wurden, hat Verfasser das reiche Zahlenmaterial der erwähnten Versuche benutzt, um mit Hülfe der transmittierten Wärmemengen und des aus den angegebenen Temperaturen mittels der logarithmischen Formel gefundenen mittleren Temperaturunterschiedes die Durchgangszahlen K und K' und daraus die Leitfähigkeit λ der verschiedenen Steine zu berechnen und somit ein Urteil über den Zusammenhang von Leitfähigkeit, chemischer Zusammensetzung und physikalischem Aufbau zu gewinnen. Die gefundenen Werte λ sind infolge des erwähnten für alle Versuche gleich großen Fehlers nicht absolut richtig, gestatten aber einen relativen Vergleich. Wie aus der Zahlentafel 27, für welche die Ergebnisse der letzten Versuchsreihe benutzt wurden, hervorgeht, läßt sich (ebenso wie bei den Versuchen des Verfassers) weder aus dem Verhältnis der Hauptbestandteile zu einander, noch aus der Struktur ein gesetzmäßiger Einfluß auf die Größe der Leitfähigkeit erkennen.

Zahlentafel 27.

Wärmeleitfähigkeit der von der Engineering Exp. Station Illinois untersuchten Steine.

Hauptbestandteile der Zusammensetzung des Steins Gewichtsprozente			Struktur des Steins	Leitfähigkeit λ (angenähert)
$\left\{\begin{matrix}Ca\,CO_3\\Mg\,CO_3\end{matrix}\right.$	$Ca\,SO_4$	Organisches		WE/m/st/^{0}C
31,4	1,5	7,7	sehr hart	0,897
9,7	8,4	18,3	hart	1,795
10,1	12,1	9,3	»	1,117
3,6	21,5	36,3	»	1,645
20,2	17,2	15,8	mittelhart	1,662
40,3	2,2	9,7	»	0,893
74,4	0,6	5,5	weich	0,694
67,0	5,8	8,2	»	1,931
57,1	12,6	7,0	sehr weich	1,990
60,4	14,9	6,3	»	0,481

Oel- und Fettablagerungen.

Die unter Fall 1 bis 4 enthaltenen Untersuchungen über die Größenordnung der in den wichtigsten Heizvorrichtungen auftretenden Wärmeausnutzungsverluste beziehen sich sämtlich auf Verunreinigungen, die sich in gleichmäßiger Stärke über die ganze wasserberührte Heizflächenseite ablagern, und wurden daher hauptsächlich für Steinkrusten geführt. In Zahlentafel 11 wurde außerdem die starke Abnahme der Durchgangszahlen durch die wärmehemmende Wirkung teerhaltiger Anstrichmassen an Hand der im Bayerischen Revisions-Verein durchgeführten Versuchsreihen nachgewiesen und gezeigt, daß bereits Schichten von 0,2 bis 0,3 mm Stärke an schädlicher Wirkung die stärksten praktisch auftretenden Steinkrusten übertreffen und somit auch die Wärmeausnutzung stärker beeinträchtigen, falls sie an der gesamten Heizfläche haften.

Aehnlich geringe Wärmeleitfähigkeit besitzen Oel- und Fettablagerungen, die häufig infolge Verwendung von Maschinen- und Kochkesselabdampf, Kondens- und Fabrikationswässern sich auf den Metallflächen von Heizvorrichtungen festsetzen. Für Mineralöle fand Ernst die außerordentlich geringe Leitfähigkeit von 0,1; dementsprechend genügt eine Oelschicht von 0,5 mm, um die gleichen Uebergangswiderstände zu erzeugen wie ein 5 mm starker schlechtleitender Steinbelag. Als anschaulichster Beweis von der ungewöhnlich stark wärmehemmenden Eigenschaft von Fettschichten kann deren ausschließliche Verwendung als Isoliermaterial in der Natur überall da dienen, wo es sich um einen besonders wirksamen Schutz tierischer Organismen gegen Wärmeverluste handelt[1]). (Subkutane Fettpolster der Warmblüter im Eismeer, der Säuglinge usw.) Nach Wärmedurchgangsversuchen von Klug[2]), die derselbe an einem mit 2 mm starkem Fettgewebe versehenen Hautstück vornahm, berechnet sich dessen Leitfähigkeit zu 0,4; für konsistentes Fett fand Lees[3]) $\lambda' = 0{,}16$, für Vaseline $\lambda' = 0{,}17$.

Die Größenordnung der Wärmeausnutzungsverluste, die durch dünne an großen Teilen der Heizfläche anhaftende Oel- oder Fettschichten hervorgerufen werden, wird der starker Steinbeläge gleichkommen und sie häufig beträchtlich übertreffen (z. B. in Abdampfheizrohren oder Oberflächenkondensatoren).

4. Abschnitt.

Einfluß der Verunreinigungen auf die Betriebssicherheit.

A) Erhöhung der Blechtemperaturen.

Bei der Beurteilung des Einflusses fett- oder ölhaltiger Verunreinigungen, die sich nur selten über die gesamte Heizfläche erstrecken, wird daher im allgemeinen die Verminderung der Wärmeausnutzung weniger ins Gewicht fallen, als vielmehr die infolge des großen Uebergangswiderstandes mit der Heizflächenbeanspruchung sehr schnell anwachsende lokale Steigerung der Blechtemperaturen, eine Erscheinung, die man mit dem Ausdruck »Wärmestauung« bezeichnet hat und die auch durch starke lokale Anhäufungen von Stein- oder Schlammschichten hervorgerufen werden kann.

Größe der Wärmestauung (abhängig von λ', δ' und α_w').

Wie oben ausgeführt wurde, ist die Wärmemenge, die durch die Flächeneinheit von der wasserberührten Heizfläche an das Wasser abströmt, direkt proportional dem Temperaturunterschied, Blechinnenseite — Wasser und indirekt proportional dem Uebergangswiderstand $\frac{1}{\alpha_w}$; bei verunreinigter Heizfläche setzt sich letzterer aus 2 Einzelwiderständeh zusammen:

$$\frac{1}{\alpha_w} = \frac{\delta'}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha_w'};$$

also aus dem Durchgangswiderstand der Isolierschicht und dem Uebergangswiderstand zwischen Isolierschicht und Wasser. Die Blechinnentemperatur findet sich demnach aus der Gleichung

$$t_i = t_w + W\left(\frac{\delta'}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha_w'}\right).$$

[1]) R. Tigerstedt, Lehrbuch der Physiologie des Menschen S. 392. 1. Aufl.
[2]) Zeitschrift für Biologie Band X (1874) S. 73 } die Leitfähigkeit bezieht sich
[3]) Zahlentafeln von Landolt-Börnstein 1905 S. 510 } auf kg, st, m, °C.

Demzufolge werden Oel- und Fettablagerungen infolge ihres kleinen λ bei gleicher Heizflächenbeanspruchung viel höhere Blechtemperaturen zur Erzeugung der Wärmeströmung benötigen, als gleich dicke Steinkrusten; in Fig. 15 sind die Blechaußentemperaturen, die sich für die bei den Versuchen erzeugten Steinbeläge gefunden haben, ferner unter Annahme des gleichen $\frac{1}{\alpha_w}$ diejenigen für einen 5,5 mm starken Stein ($\lambda = 1$) und für einen 0,5 mm starken Oelbelag ($\lambda = 0{,}1$) aufgenommen. Die punktierte Linie stellt den Temperaturunterschied Außentemperatur — Wassertemperatur dar, der mit Hülfe des Stefan-Boltzmann-schen Gesetzes aus den Versuchen mit dem starken Teeranstrich berechnet wurde.

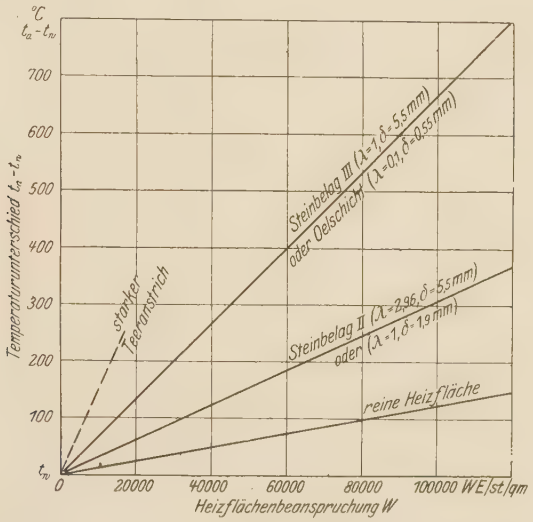

Fig. 15.

Der zweite für die Temperaturerhöhung maßgebende Faktor $\frac{1}{\alpha_w}$ ist wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit und der Konsistenz des Belages abhängig; poröse, wasserdurchlässige Steine werden im allgemeinen die Wärme leichter abführen, als dichte Beläge; Oelbeläge mit ihrer glatten Oberfläche werden ebenso wie Schlammablagerungen gegenüber Steinkrusten eine relative Steigerung des Uebergangswiderstandes und infolge dessen der Blechtemperatur verursachen.

Wirkung der Wärmestauung.

An Stellen, wo durch Verunreinigungen der Uebergangswiderstand gegenüber der reinen Heizfläche wächst, wird die zuströmende Wärme solange zur Erhöhung der Blechtemperatur verwendet, bis der Temperaturunterschied Blech — Wasser zur Ueberwindung des Widerstandes genügt. Ein Teil dieser Wärmestauung verursacht außerdem durch Abfließen der Wärme in dem gutleitenden Metall eine Temperaturerhöhung der umgebenden Heizflächenteile. Die erwähnten Ablagerungen können demnach lokale Ueberhitzungen größerer oder kleinerer Ausdehnung hervorrufen, die einerseits in den an der Ausdehnung gehinderten Konstruktionsteilen Zusatzspannungen hervorrufen und anderseits bei direkter Feuerung und hohem Wärmedurchgang die Temperatur der Bleche bis zu einem Grad erhöhen, bei dem die Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften des Baumaterials bedenklich verschlechtert werden.

Ueber die Höhe der in den ersten Teilen einer Kesselheizfläche auftretenden Temperaturen, bei den in Betracht kommenden Heizflächenbeanspruchungen, die in den direkt bestrahlten Teilen 100000 WE/qm/st und mehr betragen, gibt die Fig. 15 Aufschluß. Morison[1]) fand auf Grund von Beobachtungen an eingebeulten Flammrohren, daß bereits sehr dünne Oelüberzüge bei mäßiger Gesamtbeanspruchung Temperaturen von über 360° hervorrufen, eine Angabe, die sich auch mit dem Temperaturgebiet deckt, das für den starken Teeranstrich berechnet wurde. Hirsch[2]) hat mittels Schmelzpfropfen, die allerdings nur ein Maß für die erreichte Mindesttemperatur bilden, eine Temperatursteigerung um 250° gefunden. Durston[3]) fand ebenfalls durch Schmelzpfropfenmessung, daß die Blechinnentemperatur eines mit 1,5 mm starkem Fettbelag bedeckten, mit offenem Feuer geheizten Gefäßes 3 Minuten nach dem Anheizen bereits 325° überschritt bei 26° Wassertemperatur, also einen Temperaturunterschied von 300° zwischen Blech und Wasser. Bei Versuchen in einem mit Oelschichten verunreinigten Röhrenkessel wurden in der gleichen Weise Blechtemperaturen festgestellt, die an einer Stelle zwischen 400° und 571°, an einer andern Stelle rd. 570° betrugen bei 180° Wassertemperatur.

B) Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Kesselbaumaterialien bei hohen Temperaturen.

Die für die Beurteilung der Güte von Kesselblechen als maßgebend betrachteten Eigenschaften, deren Zugfestigkeit (Bruchbelastung K_z), deren Zähigkeit und Elastizität (Bruchdehnung, Querschnittsverminderung und Dehnungskoeffizient) und deren Widerstandsfähigkeit gegen Stoß und Erschütterung (Sprödigkeit) sind für ein Material keine Konstanten, sondern erleiden sowohl bei Kupfer, als auch bei den einschlägigen Eisenkohlenstofflegierungen bei Erwärmung der Metalle auf höhere Temperatur infolge molekularer Umlagerungen eine Veränderung gegenüber ihrer Größe bei gewöhnlicher Temperatur, und zwar erfolgt diese Verschiebung der Festigkeitseigenschaften in dem der Ueberhitzung durch Verunreinigungen entsprechenden Temperaturgebiet fast durchwegs in einem Sinne, der eine Verminderung des Konstruktionswiderstandes gegenüber den auftretenden Beanspruchungen zur Folge hat.

Die Festigkeitseigenschaften des Eisens und Kupfers bei höheren Temperaturen wurden durch Warmzerreißversuche von zahlreichen Forschern untersucht. Von den Arbeiten über die Eigenschaften von Flußeisenblechen wurden nur die Forschungsergebnisse von Martens[4]), Rudeloff[5]) und namentlich von v. Bach[6]) zu Grunde gelegt, da die Genauigkeit früherer Arbeiten nach einer Zusammenstellung von R. Baumann[7]) unter Unvollkommenheiten der Versuchseinrichtung litten; die Ergebnisse der Versuche der Regierung der Vereinigten Staaten von Amerika[8]) decken sich ziemlich genau mit denen der vorher genannten Forscher.

[1]) Engineering 1905 S. 619, The effect of oil on Boiler Furnaces.
[2]) Hirsch, a. a. O. S. 6 dieser Arbeit.
[3]) Durston, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1893 S. 726 u. f.
[4]) Mitteilungen aus den Kgl. Versuchsanstalten zu Berlin 1890.
[5]) Mitteilungen aus den Kgl. Versuchsanstalten zu Berlin 1895.
[6]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1904 S. 1300 u. f.
[7]) Die Festigkeitseigenschaften der Metalle in Wärme und Kälte. Stuttgart 1907
[8]) Morison, The effect of oil on boiler furnaces, Engineering 1906 S. 619.

In den Figuren 16, 17 und 18 sind die Größenänderung der Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Querschnittsverminderung normalen zum Kesselbau verwendeten Flußeisens als Mittelwerte der Ergebnisse der oben genannten Versuche in der Weise zur Anschauung gebracht, daß (nach dem Vorgang von R. Baumann) die Temperaturen als Abszissen und das Verhältnis der genannten Eigenschaften bei der entsprechenden Temperatur zur Größe bei Zimmertemperatur als Ordinaten aufgetragen wurden.

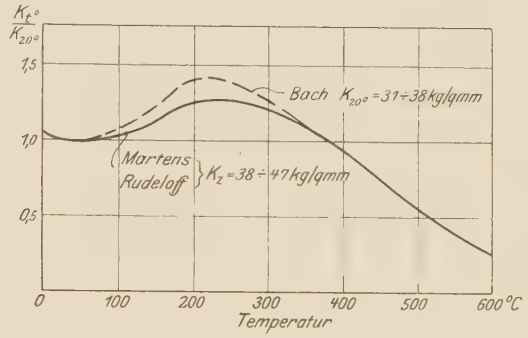

Fig. 16. Zugfestigkeit K_z des Flußeisens.

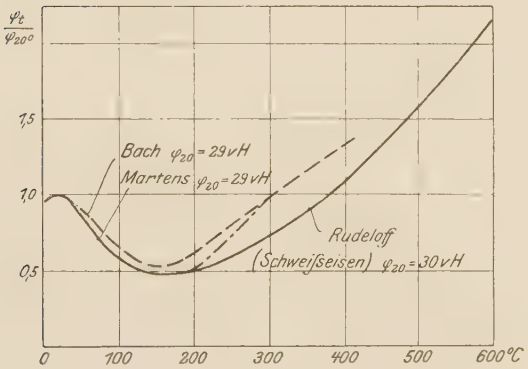

Fig. 17. Bruchdehnung φ des Flußeisens.

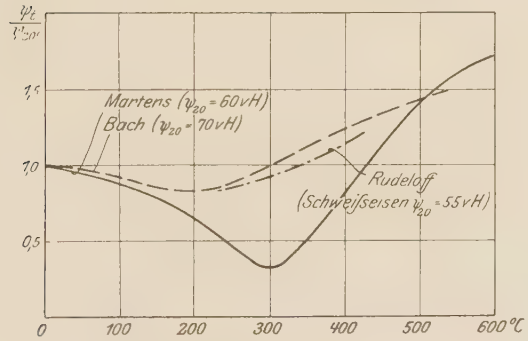

Fig. 18. Querschnittsverminderung ψ des Flußeisens.

Die Zugfestigkeit K_z, d. h. die zur Herbeiführung eines Bruches notwendige Höchstbelastung in kg/qcm, zeigt von ungefähr 50°C an ein steiles Anwachsen, erreicht ihren Höchstbetrag zwischen 200° und 300°, um dann schnell abzufallen; bei 500° beträgt die Festigkeit des Materials nur mehr rd. 50 vH der des kalten Metalls.

Der Verlauf der Zähigkeit kann aus den Fig. 17 und 18 beurteilt werden: die Nachgiebigkeit des Metalls nimmt bis ungefähr 300° ab und steigt dann schnell wieder an; die Dehnung beträgt bereits bei 400° das rd. 1,5-fache wie im kalten Zustande. Mit dem Zustande der größten Festigkeit fällt der der geringsten Zähigkeit zusammen, das Eisen ist bei rd. 300° am sprödesten; diese Abnahme der Zähigkeit steigt mit der Anfangsfestigkeit des Metalles. Das Auftreten einer derartigen, durch grobkristallinisches Bruchgefüge charakterisierten Sprödigkeit in diesem der Anlauffarbe entsprechend »Blauwärme« genannten Temperaturgebiet von 290 bis 315° und damit verbunden einer trotz höherer Festigkeit infolge der geringen Dehnung stark reduzierten Zerreißarbeit wurde außer durch Zugversuche der genannten Forscher durch Schlagversuche von Charpy[1]), sowie von Olry und Bonet u. A.[2]) nachgewiesen. Die letztgenannten haben namentlich gezeigt, daß Formänderungen in Kesseln, die eintreten, während sich Blechteile in Blauwärme befinden, dauernde Sprödigkeit dieser Stellen zur Folge haben können. Eine weitere Verschlechterung der Zähigkeit von Flußeisen äußert sich in dem bei höheren Temperaturen von Bach festgestellten Verschwinden des Streck- oder Fließvorganges, d. h. einer besonders großen Nachgiebigkeit bei Belastung von ungefähr $^3/_4$ der Zugfestigkeit, welche das Material in wenig erwärmtem Zustande befähigt, sich verhältnismäßig hohen Beanspruchungen anzupassen[3]), und deren Verschwinden leicht zu einem Ueberschreiten der Bruchdehnung und damit zur Rißbildung führen kann.

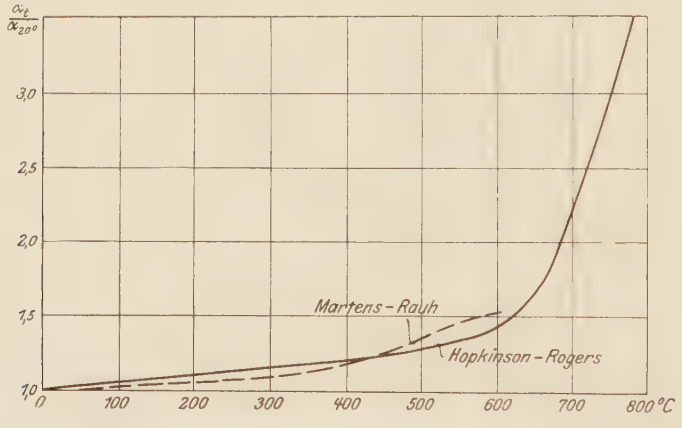

Fig. 19. Dehnungskoeffizient des Flußeisens.

Fig. 19 zeigt die Aenderung der Dehnungskoeffizienten $\alpha = \frac{1}{E}$ nach den Versuchen von Martens-Rauh[4]) und Rudeloff[4]), deren Ergebnisse infolge der großen Versuchsschwierigkeiten und durch den Umstand, daß bei den verschiedenen Temperaturen die Belastungsstufe eine verschiedene war, Ungenauigkeiten anhaften, die jedoch immerhin das Gesetz und die Größenordnung der Aenderung erkennen lassen. Die Figur zeigt ein anfangs langsames, dann sehr schnelles Anwachsen des Dehnungskoeffizienten; damit ist ausgedrückt, daß die

[1]) M. G. Charpy, Comptes rendus de la Société des Ing. Civils 1906 Heft 10 S. 662.

[2]) A. Olry und P. Bonet, Einfluß der Temperatur bei der Bearbeitung von Eisen und Stahl, Wiener Ztg. 1905. Siehe ferner Kurzwernhart, Stahl und Eisen 1896 und Gollner, Wiener Ztg. 1897 S. 71.

[3]) C. von Bach, Protokoll des Int. Verb. der Dampfk.-Ueberw.-Ver. 1904 S. 24.

[4]) a. a. O.

zur Erzeugung einer Formänderung nötigen Spannungen bei hocherhitztem Blech bedeutend geringer sind, als bei niederen Temperaturen. Eine genauere Feststellung der Veränderung des Dehnungskoeffizienten wurde durch B. Hopkinson und F. Rogers[1]) bis zu einem Temperaturgebiet von 800°C mit Eisen- und Stahlstäben in einem elektrisch geheizten Ofen mit einer Längenmeßgenauigkeit von $^1/_{50\,000}$" vorgenommen. Die Belastungsstufe der Stäbe war für alle Temperaturen gleich und blieb weit unter der Bruchbelastung. Das aus diesen Dehnungsversuchen sich berechnende Verhältnis der Dehnungskoeffizienten des erhitzten Eisens zu dem im kalten Zustand ist außer in Fig. 19 in beistehender Zahlentafel 28 enthalten und zeigt namentlich die rasche Zunahme der Dehnungskoeffizienten, und damit der Formänderung, bei Temperaturen über 600°. Die Versuche von Hopkinson und Rogers ergeben außerdem eine bedeutende Zunahme der »Elastischen Nachwirkung« mit ansteigender Temperatur, d. h. bei Entfernung der Belastung hochtemperierten Eisens erfolgt das Verschwinden der hervorgerufenen Längenänderung viel langsamer als in kaltem Zustande.

Zahlentafel 28.

°C	$\frac{\alpha_t}{\alpha_{15}}$	°C	$\frac{\alpha_t}{\alpha_{15}}$	°C	$\frac{\alpha_t}{\alpha_{15}}$
15	1,00	300	1,15	600	1,41
100	1,05	400	1,22	700	2,18
200	1,10	500	1,32	800	3,84

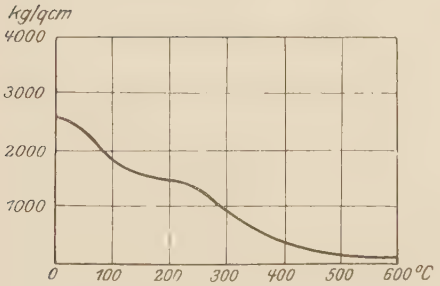

Fig. 20. Zugfestigkeit des Kupfers.

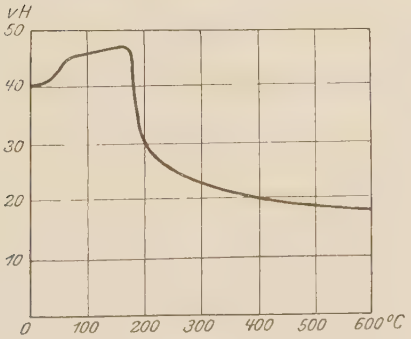

Fig. 21. Bruchdehnung des Kupfers.

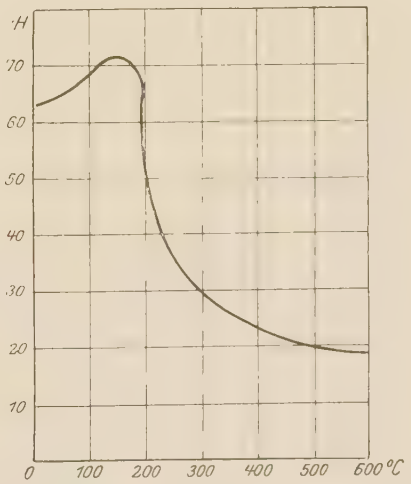

Fig. 22. Querschnittsverminderung des Kupfers.

Die Abnahme der Festigkeitseigenschaften von Kupfer bei höheren Wärmegraden ist viel schneller als bei Eisen; aus den Fig. 20, 21 und 22 ist nach

[1]) Engineering Record Vol. 52 Nr. 21 S. 568.

den Versuchen von R. Stribeck[1]) das Verhalten der genannten Eigenschaften ersichtlich. Die auch in den Würzburger Normen berücksichtigte ständige und schnelle Abnahme der Zugfestigkeit, sowie der namentlich bei 200° sehr steile Abfall der Zähigkeit lassen hier das Auftreten der durch Verunreinigungen hervorgerufenen hohen Temperaturen noch bedenklicher erscheinen als bei Eisen.

C) Folgen der Temperaturerhöhung und Festigkeitsverminderung der Bleche.

Fig. 15 gibt ein anschauliches Bild über die Größe der Temperaturunterschiede, die namentlich bei hohem Wärmedurchgang (Stichflammen) als Folge lokaler Verunreinigungen zwischen benachbarten reinen und unreinen Stellen eines Bleches, oder bei weiter ausgedehnten Ablagerungen zwischen benachbarten Konstruktionsteilen hervorgerufen werden[2]); dieselben können bereits bei dünnen Belägen, also in Temperaturgebieten, die noch keine wesentliche Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften bedingen, Werte von über 100°C erreichen. Treten solche Temperaturdifferenzen in Blechteilen auf, die infolge geringer Nachgiebigkeit sich gegenseitig an der durch die Wärmeausdehnung bedingten Längenänderung hindern, so erzeugen sie in den wärmeren Teilen Druck-, in den kälteren Zugspannungen, die bei den angeführten Differenzwerten zu beträchtlicher Größe anwachsen. Bezeichnet α_σ die Dehnung der Längeneinheit durch die Spannung 1 kg/qcm, α_t diejenige durch Erwärmung um 1°C, so ist zur Erzeugung einer Längenänderung, die aus einer Erwärmung um t^0 resultiert, eine Spannung $\sigma = \frac{\alpha_t}{\alpha_\sigma} t$ notwendig. Für Flußeisen ist $\alpha_t = {}^1/_{80\,000}$, $\alpha_\sigma = {}^1/_{2\,000\,000}$; demnach entspricht jedem Grad Temperaturunterschied eine Zug- oder Druckbeanspruchung von 25 kg/qcm; ein Temperaturunterschied von 75° zwischen benachbarten Konstruktionsteilen genügt bereits, um bei vorher unbelastetem Flußeisen ein Ueberschreiten der Elastizitätsgrenze und damit eine bleibende Formänderung herbeizuführen. In Dampfkesselblechen, in denen ohnehin bedeutende Spannungen herrschen, genügt hierzu bereits ein viel geringerer Unterschied. Treten derartige Wärmespannungen in Blechen auf, die in Bezug auf Festigkeit noch verhältnismäßig wenig geschwächt sind, so äußern sich deren Folgen meist in Undichtheiten von Heiz- und Siederohrbefestigungen, leichtem Eindrücken von Rohrplatten, Zerrung und Undichtheit von Nietnähten u. dergl., also in Erscheinungen, die weniger eine unmittelbare Betriebsgefahr, als vielmehr Betriebsstörung und Ausbesserungsnotwendigkeit (wegen der Korrosionen) bedeuten. Ein häufiger Wechsel der Heizflächenbeanspruchung kann jedoch auch bei verhältnismäßig geringen Wärmespannungen durch den steten Wechsel von Dehnung und Stauchung eine »Ermüdung«[3]) des Materials und damit eine Rißbildung vorbereiten.

Bei stärkeren Steinbelägen, bei Bildung sogenannter Kuchen, bei Schlammansammlungen und Oel- oder Fettablagerungen stellen sich, wie ebenfalls aus Fig. 15 ersichtlich, infolge der Wärmestauung Blechtemperaturen ein, die namentlich in den ersten Heizflächenteilen direkt gefeuerter Heizvorrichtungen nach den Ergebnissen des vorigen Abschnittes beträchtliche Festigkeitsverminderung

[1]) Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1903 S. 559 u. f.

[2]) Falls kein ausgleichendes Fließen der Wärme im Blech stattfinden würde: die Erfahrungen der Praxis zeigen, daß dies nur in geringem Maße der Fall ist (Schweißtechnik).

[3]) Kreuzpointner, »Uebermüdung der Metalle«, Stahl und Eisen 1895 S. 865.

des Materials mit sich bringen. Die aus Fig. 18 ersichtliche Abnahme der Zugfestigkeit K_z gibt gleichzeitig ein Bild der Abnahme des Sicherheitskoeffizienten »$\varkappa$«, der auf Grund der Zugfestigkeit des kalten Materials berechneten Kesselwandungsteile und Nietverbände, und damit der gesamten Konstruktionsfestigkeit, soweit dieselbe den zur Berechnung benutzten Formeln entspricht.

Die bei den hier herrschenden Temperaturen eintretende große Nachgiebigkeit der erhitzten Blechteile, die sich in dem Ansteigen der Dehnungs- und Querschnittsverminderungskurven und vor allem in dem Anwachsen der Dehnungskoeffizienten äußert, erleichtert dem Zusammenwirken von Dampfdruck und Wärmespannungen, welch letztere Biegungs- und Knickungsbeanspruchungen über die vorhandenen Zugspannungen superponieren, die Herbeiführung größerer bleibender Formänderungen. Dieselbe geht in Gestalt von Einbeulungen und Ausbauchungen der zylindrischen Wandungen vor sich, je nachdem letztere sich unter äußerem oder innerem Ueberdruck befinden. Da die Einbeulung bei äußerem Ueberdruck, z. B. die von Flammrohren, welche zur Zerstörung des ganzen Rohres führen kann, als Folge von ölhaltigen Steinbelägen eine besonders häufige Erscheinung ist, so sei an Hand der Hopkinson-Rogersschen Versuche nachgewiesen, wie schnell die Einbeulgefahr mit der Größe der Wärmestauung und damit mit der Erhöhung der Blechtemperatur anwächst. Bei zylindrischen glatten Flammrohren genügt bekanntlich eine geringe Abweichung vom kreisrunden Querschnitt, um unter der Wirkung des äußeren Ueberdruckes eine stetig wachsende Einbeulung einzuleiten. Nach Föppl-Forchheimer[1]) berechnet sich der kritische Ueberdruck, der zur Ueberwindung der elastischen Kräfte des Rohres genügt, und eine dauernde Eindrückung herbeiführt, aus der Gleichung:

$$p_k = \frac{4\Theta}{\alpha R^3},$$

wobei Θ das Trägheitsmoment und R den Radius bedeutet. Für einen Streifen von der Länge 1 in axialer Richtung und der Blechstärke s wird

$$p_k = \frac{1}{3\alpha}\left(\frac{s}{R}\right)^3$$

(für Rohrstücke, die nicht in der Nähe von Versteifungen oder Rohrenden liegen). Die theoretisch abgeleitete Formel wurde durch zahlreiche Versuche von Carmann und Carr[2]), sowie von Stewart[3]) bestätigt.

Nach den Hamburger Normen beträgt die Blechstärke eines 2 m langen glatten Flammrohres für 10 at Ueberdruck bei 800 mm Dmr. 14,5 mm. Wird $\frac{1}{\alpha} = 2\,100\,000$ gesetzt, so berechnet sich der kritische Ueberdruck für das Rohr im kalten Zustand zu

$$p_k = \frac{2\,100\,000 \cdot 1{,}45^3}{3 \cdot 40^3} \infty 33 \text{ at.}$$

Das glatte Rohr besitzt demnach im kalten Zustand eine 3,3fache Sicherheit gegen den Beginn einer Einbeulung beim Betrieb mit dem höchstzulässigen Druck. Nach den in Zahlentafel 29 enthaltenen Werten für α würde eine lokale Erhitzung des Rohrstreifens auf 600° genügen, um den Sicherheitskoeffizienten auf 2,4 zu ermäßigen, und infolge der hinzutretenden Wärmespannungen wäre

[1]) Föppl, Festigkeitslehre Mech. III 1902 S. 376.

[2]) Carmann und Carr, American Machinist Bd. 29 S. 763

[3]) Stewart, Am. Soc. of Mech. Engineers 1906

} Zusammenstellung der Ergebnisse bei Preuss, Stahl u. Eisen 1907 S. 1844.

bereits bei dieser Temperatur eine Abflachung zu befürchten. Bei einer lokalen Ueberhitzung auf ungefähr 750° könnte das Rohr, auch ohne Auftreten von Wärmespannungen, keinen Widerstand mehr gegen Einbeulung leisten. Bei Wellrohren, die nach von Morison[1]) angeführten Versuchen in kaltem Zustand etwa 5 fache Sicherheit besitzen, wäre eine Erhitzung auf rd. 850° zur Einbeulung erforderlich, Temperaturen, die in den ersten Heizflächenteilen bei Schlamm-, Stein- und Oelablagerungen, namentlich bei forciertem Betrieb, sehr wohl auftreten können.

Aehnliche Ueberhitzungen genügen auch, um Ausbauchungen an zylindrischen Wandungen mit innerem Ueberdruck herbeizuführen.

Die Schädlichkeit kleiner örtlicher Deformationen, die, außer beim Auftreten an schlechten Schweißnähten, nur selten unmittelbar die Entstehung größerer Risse zur Folge haben[2]), äußert sich vornehmlich in der von der Vertiefung begünstigten stärkeren Ablagerung von Verunreinigungen und damit in der gesteigerten Ueberhitzungs- und Korrosionsmöglichkeit, welche häufig zum Durchrosten der Beulen führt.

Bei starkem Belag wenig elastischer Teile (Heiz- und Siederohre, glatte Flammrohre) können bereits bei normalem Betrieb die durch Temperaturunterschiede hervorgerufenen Wärmespannungen bis zur Ueberschreitung der Bruchdehnung des Materials gesteigert werden und damit zu Rissen an Rundnietnähten, Bördelungen und Krempungen. Ebenso begünstigen rasches Anheizen oder schnelle Abkühlung (Oeffnen der Feuertür), sowie stark wechselnde Beanspruchung der Heizfläche bei starken örtlichen Ablagerungen infolge der wiederholten Spannungswechsel im Verein mit der Festigkeitsverminderung der erhitzten Stellen die Entstehung von Rissen in vollem Blech[3]).

Jede durch schnelles Erwärmen oder Abkühlen einer in Blauwärme befindlichen Heizfläche verursachte Längenänderung, welche die hierbei stark verminderte Bruchdehnung der erhitzten Stelle überschreitet, muß zu einer Trennung des Bleches führen, ebenso Beanspruchungen in Höhe der Streckgrenze, denen das wenig erhitzte Material sich durch Fließen anpaßt, während in der Blauhitze das spröde gewordene Blech reißt. Blechstellen, die während des Betriebes durch Ausdehnung in der durch Belag hervorgerufenen Blauwärme dauernd spröde geworden sind, erleiden häufig bei späterer stoßweiser Erschütterung (Schürhaken, Pickhämmer zum Steinablösen) plötzliche Zerreißung. Ferner kann die verstärkte elastische Nachwirkung der erhitzten Stellen bei schneller Abkühlung in den benachbarten Teilen, die bereits ihre Längenveränderung erlitten haben, noch nach längerer Zeit bedenkliche Zugspannungen hervorrufen.

Auf die Risse, die infolge Durchrostens von Einbeulungen oder durch Verletzungen der Schweißnähte als indirekte Folge der Verunreinigungen eintreten können, wurde bereits hingewiesen.

Jede Vergrößerung derartiger durch Ueberhitzung infolge von Heizflächenablagerungen entstandener Risse kann die Ursache für den plötzlichen Austritt von größeren Wasser- und Dampfmengen und damit den Anlaß einer Kesselexplosion bilden.

[1]) Engineering 1905, 12. Mai.

[2]) O. Knaudt, Zeitschrift des Bayerischen Revisions-Vereins 1906 S. 193.

[3]) Baumann, Rißbildung in Kesselblechen, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1907 S. 1982; ferner: C. von Bach, Protokoll der 33. Deleg.-Versammlung des Intern. Verb. der Dampfk.-Ueberw.-Vereine 1904 S. 152.

Eine andere Begleiterscheinung häufiger Ueberhitzung ist das Verbrennen und Abblättern von Blechen, die im ersten Feuer liegen, ein Vorgang, der ebenso wie das Ablösen von Oxydschichten bei der Entfernung des Steins mit der Zeit eine unzulässige Schwächung der Wandstärke verursacht.

Die Verminderung des Wasserraumes bei engstehenden Heizrohren, das teilweise Zuwachsen von Speiseleitungen und Ekonomiser-Querschnitten, die schädliche Wirkung mitgerissener Schlammteile in Dampfmaschinen, namentlich aber das Verlegen von Armaturen, besonders der Wasserstandsgläser, und ähnliche auf Stein- und Schlammbildung zurückzuführende Erscheinungen lassen gleichfalls die Verwendung weichen Wassers oder mindestens die häufige Reinigung der Kessel im Interesse der Betriebsicherheit höchst wünschenswert erscheinen.

5. Abschnitt.

Wirtschaftlichkeit der Wasserreinigung bei der Dampferzeugung.

Zur Verhütung starker Steinablagerungen auf Heizflächen können 2 Wege begangen werden: die Außerbetriebsetzung und mechanische Reinigung der Heizvorrichtungen in verhältnismäßig kurzen Zeitabschnitten, oder die kontinuierliche Enthärtung des Wassers in Reinigern vor dessen Eintritt in die Heizvorrichtung, ein Verfahren, das meist erst nach langer Betriebsdauer das Entstehen stärkerer Krusten zuläßt und damit eine mechanische Entfernung derselben notwendig macht.

Die Entscheidung, zu welcher Art der Steinbekämpfung man in industriellen oder Verkehrsanlagen greift, wird gewöhnlich von Erwägungen wirtschaftlicher Natur abhängig gemacht, d. h. für die Errichtung einer ein verhältnismäßig großes Anlagekapital erheischenden Speisewasserreinigung wird häufig eine Gewinnachweisrechnung als ausschlaggebend betrachtet, die sich hauptsächlich auf die Gegenüberstellung der folgenden Posten stützt:

A) Jährliche Unkosten für Anlage und Betrieb der Reinigung:
   1) Verzinsung und Amortisation des Anlagekapitals.
   2) Kosten für Chemikalien und Filtermaterial.
   3) » » Unterhaltung und Bedienung.
   4) » » Wärme- und Kraftbedarf.

B) Jährlicher Gewinn durch die Reinigung:
   1) Verminderung des Brennstoffkontos.
   2) » der Reinigungskosten.
   3) » der Reparaturkosten.
   4) Verlängerung der jährlichen Betriebsfähigkeit } der Heizvorrichtungen.
   5) Verminderung der Abnutzung }
   6) Vermeidung von Betriebstörung und Unfällen.

Eine allgemeine Bewertung der einzelnen Posten ist nicht durchführbar, dieselben sind in jedem Einzelfalle von der Wasserhärte, dem System der Reinigung, sowie von der Art und der Belastung der Heizanlage abhängig. Für die Verminderung des Kohlenkontos ist, soweit nicht Fabrikationsvorgänge durch das gereinigte Wasser günstig beeinflußt werden, eine sinngemäße Zusammenfassung der oben festgestellten Wärmeausnutzungsverluste für die in der Anlage befindlichen Heizvorrichtungen maßgebend. Die Verminderung der Reparaturen und damit die Verlängerung der Betriebs- und Lebensdauer fallen namentlich bei forciertem Betrieb von Röhrenkesseln, vor allem Lokomotiven,

ins Gewicht. (Die zur Erwärmung des Wassers im Reiniger verwendete Wärme kommt größtenteils dem Kessel wieder zugute, ist also nicht ganz als Verlust zu rechnen.)

Nachfolgend sind, Mitteilungen der Betriebsleitung entsprechend, Erfahrungen für drei verschiedenartige Betriebe zusammengestellt, die ungefähr mittlere Verhältnisse darstellen.

1) Ortsfeste Kesselanlage (Textilfabrik), normaler Betrieb.

Wasserhärte vor der Reinigung . . . . 10 bis 12°.
» nach » » . . . . 4°.

Jährliche Amortisation und Verzinsung der Reinigungsanlage	ℳ 990,—
Betriebskosten:	
1) Bedienung	» 108,—
2) Chemikalien	» 1401,—
3) Filtermaterial	» 57,50
4) Revisionsgebühr	15.-
	ℳ 2601,50
Ersparnis an Reinigungskosten	» 928,—
Jährliche Unkosten für die Reinigung	ℳ 1673,50

Gereinigt werden jährlich:

a) für Kesselspeisung . . . . . 45150 cbm Wasser
b) » Fabrikationszwecke . . . 23400 » »

Das Kohlenkonto ergibt sich bei einem Dampfpreis von ℳ 2,89 zu rund ℳ 131000,—. Beträgt die Ersparnis an Brennstoff und Reparaturen nur 1,3 vH, so sind ohne Rücksicht auf die Vorteile der Fabrikation mit reinem Wasser, für die allein ein Drittel der Reinigungskosten verwendet werden, die Unkosten der Reinigung bereits gedeckt.

In stationären Anlagen mit nicht sehr hartem Wasser und normalen Betriebsverhältnissen wird dementsprechend der Betrieb einer Wasserreinigung zum mindesten keine wesentlichen Unkosten verursachen, Verzinsung und Betriebskosten werden durch Einsparung an Brennstoff und Arbeitslöhnen für Reinigung und Reparaturen meist vollständig gedeckt[1]); außer dem zahlenmäßig überhaupt nicht einschätzbaren Wert der vermehrten Betriebsicherheit kommt für vollbelastete Anlagen der weitere Vorteil in Betracht, daß die längere Betriebsfähigkeit der Heizvorrichtungen (Kessel, Ekonomiser, usw.) eine Reserve oder Vergrößerung, die bei häufiger Außerbetriebsetzung behufs Reinigung und Reparatur erforderlich wäre, und damit die Investierung eines größeren Kapitals bei gleicher Produktion häufig entbehrlich macht.

Noch mehr zu Gunsten der Einrichtung einer Reinigungsanlage gestaltet sich die Gewinn- und Verlustrechnung in Anlagen, die 2) mit sehr schlechtem Wasser oder 3) mit ständig forciertem Betriebe zu rechnen haben. Zur Veranschaulichung für den ersten Fall seien die Erfahrungen, die in einem Bergwerksbetriebe bei Verdampfung von Grubenwasser gesammelt wurden, für den zweiten einige Ergebnisse mit Speisewasserreinigung in Eisenbahnbetrieben mitgeteilt.

[1]) Zu dem gleichen Ergebnis gelangte G. Nimax in der Arbeit »Die Aufbereitung des Wassers zu gewerblichen Zwecken«, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1877 S. 358. Angaben von 20 und mehr vH Brennstoffersparnis, wie sie Handy, »The purification of water for the production of steam«, Transactions of the American Society of Civil Engineers Vol. LIX Part A für einige amerikanische Fabriken als Folge von Speisewasserreinigung anführt, dürften unzuverlässig sein.

Dem »Bericht über Dampfkesselrevisionen im Bezirke der kgl. Bergwerksdirektion zu Saarbrücken[1]) im Etatsjahre 1903« seien folgende Angaben entnommen:

Ersparnisse durch Anwendung von Speisewasser-Reinigern auf den Gruben Sulzbach und Altenwand:

Durchschnittliche Jahreskosten vor Benutzung des Reinigers

bei den Mellinschächten der Grube Sulzbach.		bei den Eisenbahnschächten der Grube Altenwand.	
Reinigung der Kessel . .	ℳ 3000,—	Reinigung der Kessel . .	ℳ 4000,—
Reparaturen	» 8000,—	Reparaturen	» 10000,—
Summe	ℳ 11000,—	Summe	ℳ 14000,—

Nach der Aufstellung von Reinigern:

Reinigung der Kessel . .	ℳ 1800,—	Reinigung der Kessel . .	ℳ 2000,—
» des Wassers .	» 2300,—	» des Wassers .	» 1600,—
Kesselreparaturen . . .	» 2500,—	Kesselreparaturen . . .	» 5000,—
Summe	ℳ 6800,—	Summe	ℳ 8600,—
Ersparnis	ℳ 4200,—	Ersparnis	ℳ 5400,—

›Die Kesselreparaturen werden nach und nach beinahe ganz aufhören, so daß die Ersparnisse noch um ℳ 3000 bis 4000 steigen können. Die Anschaffungskosten der Wasserreiniger betrugen ℳ 5200 bezw. ℳ 4500, sind also durch die Ersparnisse eines Betriebsjahres gedeckt.«

Für den Fall ständig forcierter Kessel seien die Betriebserfahrungen einiger Eisenbahngesellschaften über die Vorteile der Wasserreinigung mitgeteilt. Die Direktion der Thüringischen Eisenbahnen stellt für das Jahr nach Einführung der Reinigung gegenüber dem vorhergehenden eine Brennstoffersparnis von 15 vH und eine Verminderung der Reparaturkosten von 9 vH fest[2]). »Wird nur der vierte Teil hiervon als Erfolg der Wasserreinigung gerechnet, so sind die Kosten in reichlichem Maße gedeckt.«

Amerikanische Gesellschaften[3]) stellen Brennstoffersparnisse von 7 bis 15 vH und Reinigungs- und Reparaturersparnisse von 30 bis 40 vH fest. Parr[4]) gibt bei durchschnittlich 3 mm starkem Steinbelag in Lokomotiven einen Brennstoffmehrverbrauch von 10 vH und eine Erhöhung des Reparaturkontos um 75000 Dollar an (bei nur 5 vH Steigerung des Kohlenverbrauches würden die jährlichen Mehrausgaben bei einer Verzinsung von 5 vH einem investierten Kapital von 3000000 Dollar entsprechen).

Die Vermehrung des Brennstoffverbrauches ist im Lokomotivbetriebe nicht lediglich auf die verminderte Wärmeausnutzung (nach früherem $\varepsilon = 6$ bis 9 vH), sondern auch auf die zahlreichen Anheiz- und Abblaseverluste, sowie auf den bei der häufigeren Außerbetriebsetzung verloren gehenden Wärmeinhalt der Kessel zurückzuführen. Der erhebliche Rückgang der Reparatur- und Reinigungskosten kann durch den Umstand beleuchtet werden, daß nach

[1]) Zeitschrift des bayerischen Revisions-Veriens 1904 S. 99.

[2]) Thielmann, Dampfkesselanlagen, 1881, S. 366.

[3]) Haudy, a. a. O.

[4]) Parr, Die Betriebswasser eines Eisenbahnsystems, Zeitschr. für angew. Chemie 1906 S. 1519.

den Angaben einer Gesellschaft nach Einführung der Reinigung die Rohrauswechslung sich alle 2½ Jahre statt wie früher alle ½ Jahre als erforderlich erwies[1]).

Zusammenfassung.

Wenn auch derartige Zahlen (wegen der häufig gleichzeitigen Einführung anderer Betriebsverbesserungen) nicht ganz auf Rechnung der Wasserreinigung gesetzt werden dürfen, so lassen sie doch erkennen, daß selbst Bruchteile der angeführten Ersparnisse die Anlage von Wasserreinigungen auch vom wirtschaftlichen Standpunkt aus in den meisten Fällen gerechtfertigt und empfehlenswert erscheinen lassen, zumal durch die Reinigung des Speisewassers auch die Korrosionsgefahr in erheblichem Maße vermindert wird.

Auf Grund einer ausgedehnten Rundfrage in deutschen Dampfkraftanlagen gelangte Moscheles[2]) zu folgender Zahlentafel, welche für die verschiedenen gebräuchlichen Kesseltypen eine Uebersicht über den Grad der Wasserhärte gibt, bei dem erfahrungsgemäß die Einrichtung einer Reinigungsanlage sich als wünschenswert und wirtschaftlich erweist:

Art der Kesselanlage	Reinigung nicht notwendig	Reinigung empfehlenswert	ungereinigtes Wasser unzulässig
	Härtegrade	Härtegrade	Härtegrade
Großwasserraumkessel	0 bis 20	20 bis 40	über 40
kombinierte Kessel*)	0 » 12	12 » 27,5	» 27,5
Röhrenkessel	0 » 10	10 » 15	» 15
Wasserrohrkessel unter bewohnten Räumen**)	0 » 8	stets empfehlenswert	—

*) d. h. Großwasserraumkessel mit Siederohr- bezw. Wasserrohrkessel.
**) jetzt Reinigung gesetzlich vorgeschrieben.

Die sorgfältige Befreiung des Kesselspeisewassers von öl- und fetthaltigen Substanzen ist in jedem Fall unbedingt erforderlich.

Allgemein sollte für die Beschaffung von Wasserreinigern weniger die Rentabilitätsfrage, als vielmehr die Erhöhung der Betriebsicherheit ausschlaggebend sein; ein einziger, durch Heizflächenverunreinigungen verursachter Betriebstillstand oder Unfall kann unter Umständen für den Besitzer der Heizanlage einen größeren wirtschaftlichen Schaden zur Folge haben, als ihm durch Anlage und Betrieb einer nicht unmittelbar rentierenden Reinigung in langen Jahren erwächst.

Schlußwort.

Aus den vorstehenden Untersuchungen können folgende Hauptergebnisse hervorgerufen werden:

1. Abschnitt. Die mit der beschriebenen Versuchsanordnung durchgeführten Versuchsreihen mit reinen und verunreinigten Heizflächen liefern einen für technische Zwecke hinreichend genauen Beitrag zur Aufklärung über den Wärmedurchgang von Heizgas durch Blech an Wasser, bei gleichzeitiger Uebertragung durch Leitung, Konvektion und Strahlung.

a) Reine Heizfläche. 1) Sie liefern Absolutwerte für die Durchgangszahlen K im Temperaturgebiet 300 bis 700° und zeigen, daß der Uebergangswiderstand von Blech an Wasser (bei horizontalen Flächen) vielfach unterschätzt wird. 2) Sie beweisen für die Wärmeübertragung die Anwendbarkeit des

[1]) Handy, a. a. O.
[2]) Zeitschr. für Berg-, Hütten- u. Masch.-Industrie Jahrg. XIII Nr. 47.

Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes und ermöglichen eine angenäherte Trennung der Konvektion von der Strahlungsübertragung, sowie eine Verallgemeinerung der Berechnungsweise des Wärmeüberganges für den gewöhnlichen Fall der Wärmeübertragung in direkt gefeuerten Vorrichtungen.

b) Verunreinigte Heizfläche. Sie zeigen die Größe und ermöglichen eine Erklärung des Einflusses wärmehemmender Ablagerungen auf die Verminderung des Wärmedurchganges und die Erhöhung der Blechtemperaturen; die künstlich hergestellten Verunreinigungen erweisen sich inbezug auf Leitfähigkeit und Struktur als normal. Ein gesetzmäßiger Einfluß der chemischen Zusammensetzung auf die Leitfähigkeit der Steine kann weder aus den eigenen Versuchsergebnissen, noch aus anderweitig untersuchten Steinen erkannt werden.

2. Abschnitt. Die Verminderung des Wärmedurchganges, d. h. die prozentuelle Abnahme der Wärmedurchgangszahlen K infolge von Verunreinigungen (Stein- und Oelrückstände) wurde ermittelt für die Wärmeübertragung von Heizgasen, Sattdampf und Flüssigkeiten durch technisch verwendete Heizflächen an Wasser; für den Wärmeübergang von Heizgasen an Wasser bei gleichzeitiger Strahlung und Berührung wurden die Versuchsergebnisse und die Folgerungen aus denselben zu Grunde gelegt.

3. Abschnitt. a) Mit Hülfe der im 2. Abschnitt gefundenen Werte für die Verminderung der Durchgangszahlen wurde für alle wichtigen technischen Heizvorrichtungen die Größenordnung des durch Verunreinigungen entstehenden Wärmeausnutzungsverlustes untersucht, bezw. an Hand der systematisch zusammengestellten und teilweise neu abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten für den Verlauf des Wärmedurchganges längs der Heizfläche der Lösungsweg zur Berechnung des Verlustes in jedem Fall angegeben.

Es zeigt sich besonders, daß in allen Fällen, in denen einer der Wärmeträger seine Temperatur längs der Heizfläche ändert, der Wärmeausnutzungsverlust nie die Höhe der Verminderung des Wärmedurchganges erreicht; die Abnahme der Wärmeausnutzung ist für die gleiche Verunreinigung nicht konstant, sondern von der Heizflächengröße und der Art der Wärmeübertragung an die Heizfläche abhängig und in weiten Grenzen veränderlich. Während bei Wärmeübergang von Sattdampf und Flüssigkeiten an Wasser die Wirksamkeit der Heizvorrichtung im ungünstigsten Falle bis auf die Hälfte verringert werden kann, beträgt der Wärmeausnutzungsverlust in normal betriebenen Vorrichtungen durch gleichstarke Ablagerungen bei Berührungsübertragung von Heizgas an Wasser nur ungefähr den zehnten Teil des eben genannten Verlustes, und wird namentlich für den Fall kräftiger Strahlungsübertragung in normal beanspruchten Vorrichtungen (z. B. nicht forcierte Dampfkessel) nur unbedeutende Beträge erreichen. Es wird gezeigt, daß der Einfluß des Kesselsteins gerade in Dampfkesseln inbezug auf die Verminderung der Wärmeausnutzung bedeutend überschätzt wird, während man dem schädlichen Einfluß auf die Heiz- bezw. Kühlwirkung zahlreicher andrer Heizflächen (Kondensatoren, Heizschlangen, usw.) vielfach zu wenig Gewicht beilegt.

Die in der technischen Literatur verbreiteten Zahlen für die Verminderung der Wärmeausnutzung in Dampfkesseln haben ihrer Größenordnung nach lediglich für die Verminderung der Wärmedurchgangszahlen Geltung.

b) Der auf Grund der im 1. Abschnitt abgeleiteten Gesetzmäßigkeit berechnete Verlauf des Wärmedurchganges lieferte für verschiedene Kesselkonstruktionen Ausnutzungswerte, Heizflächenbeanspruchungen und Endtemperaturen, die mit den Erfahrungen der Praxis durchaus im Einklang stehen.

4. Abschnitt. Ursache und Größen der infolge von Verunreinigungen auftretenden Wärmestauung in Kesselblechen wurden beleuchtet und die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Kesselbaumaterialien bei den einschlägigen Blechtemperaturen an Hand der bisherigen Forschungen zusammengestellt. Die Größe der Wärmespannungen, die bei den auftretenden Temperaturunterschieden in Konstruktionsteilen entstehen, wurde untersucht und die Wirkungen, welche dieselben im Verein mit der geschwächten Widerstandsfähigkeit der Bleche zur Folge haben, erklärt und zum Teil rechnerisch begründet. Es wurde gezeigt, daß im Interesse der Betriebssicherheit die Verwendung weichen Speisewassers oder häufige Kesselreinigung dringend anzuraten ist.

5. Abschnitt. An Hand von Gewinn-Nachweisrechnungen ausgeführter Betriebe wurde die wirtschaftliche Berechtigung der Errichtung von Speisewasser-Reinigungsanlagen untersucht, mit dem Ergebnis, daß für normal beanspruchte Betriebe mit mäßig hartem Wasser die Anlage derselben zum mindesten keine hohen Unkosten verursacht und daß dieselbe bei hartem Wasser oder forcierten Betrieben stets der häufigen mechanischen Reinigung wirtschaftlich vorzuziehen ist. In Anbetracht der vermehrten Betriebssicherheit ist die Errichtung von Speisewasserreinigungen für größere Dampfkraftanlagen (über 12° Wasserhärte) immer ratsam.

Buchdruckerei A. W. Schade, Berlin N., Schulzendorfer Str. 26.